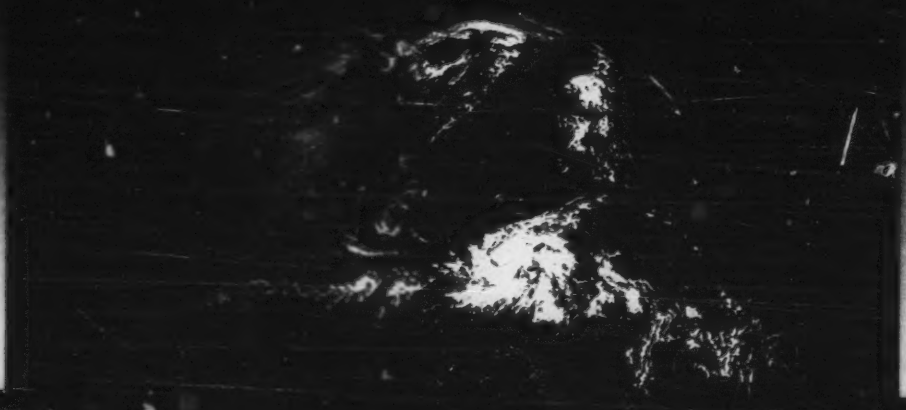
Environnement Canada | Environment Canada

# *Rapport sur l'état de l'environnement*



*Rapport sur l'état de l'environnement*

# Comprendre l'atmosphère en évolution

## Revue de la science de base et des implications d'un changement du climat et d'un appauvrissement de la couche d'ozone

Henry Hengeveld

Service de l'environnement atmosphérique
Environnement Canada

This publication is also available in English under the title *Understanding Atmospheric Change*

Rapport sur l'état de l'environnement nº 91-2
Mars 1991

Imprimé sur du papier recyclé

92-01478/

Publié avec l'autorisation du ministre de l'Environnement
© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1991
ISBN 0-662-96769-0
ISSN 1180-3177

Catalogage avant publication

Hengeveld, Henry, 1947

Comprendre l'atmosphère en évolution : revue de la science de base et des implications d'un changement du climat et d'un appauvrissement de la couche d'ozone.

(Rapport sur l'état de l'environnement, ISSN 1180-3177 : Rapport EDE n° 91-2)
Available in English: Understanding atmospheric change.
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 0-662-96769-0
N° de cat. MAS enl-11/91-2F

1. Climat—Changements—Aspect de l'environnement. 2. Ozone atmosphérique—Réduction—Aspect de l'environnement. 3. Air—Pollution—Aspect de l'environnement. I. Canada. Environnement Canada. II. Titre: Revue de la science de base et des implications d'une changement du climat et d'un appauvrissement de la couche d'ozone. III. Coll. : Rapport sur l'état de l'environnement : Rapport EDE n° 91-2.

QC981.8.C5H46 1991 551.5'25 C91-098609-6

# Avant-propos

Dans le Plan vert qu'il a publié en décembre 1990, le gouvernement du Canada s'est engagé à «assurer aux générations présentes et futures un environnement sûr et sain et une économie forte et prospère». C'est en ayant accès à des informations crédibles et objectives que l'on pourra sensibiliser davantage les Canadiens à l'environnement, prendre des décisions mieux éclairées et, en dernier ressort, assurer la pérennité de notre patrimoine naturel, économique et culturel.

Le Canada, comme de nombreux autres pays, a institué un programme de rapports sur l'état de l'environnement à l'intention des Canadiens qui s'intéressent au milieu naturel dans lequel ils vivent. Ce programme comprend notamment des feuillets d'information, des rapports spéciaux, des bulletins, des indicateurs environnementaux, des bases de données et des rapports nationaux quinquennaux.

Ces produits sont le résultat d'un partenariat de plus en plus fécond réunissant les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux, l'entreprise privée, les universités, les organismes non gouvernementaux et les particuliers. Comme les décisions et les activités de tous les échelons de la société influent sur l'environnement, il est de la plus haute importance, pour tous ces partenaires, que les renseignements et les évaluations sur l'environnement soient publiés en temps opportun et qu'ils soient crédibles.

La collection des rapports sur l'état de l'environnement fournit aux Canadiens des analyses et des interprétations de données à la fois objectives et consciencieuses, qui révèlent les principales conditions et tendances de l'environnement. Les explications touchant ces tendances et les mesures prises pour préserver et mettre en valeur le milieu naturel sont tout aussi importantes.

Comprendre l'atmosphère en évolution constitue l'une des pierres de la fondation sur laquelle doit s'édifier notre compréhension du milieu naturel et de notre rôle dans sa préservation. Une sensibilisation accrue à l'état de l'environnement devrait nous inciter à protéger ce «système entretenant la vie» en ayant recours à des processus décisionnels et gestionnels améliorés.

Pour obtenir des renseignements supplémentaires au sujet des rapports sur l'état de l'environnement, prière d'écrire à l'adresse suivante :

**Rapports sur l'état de l'environnement**
**Environnement Canada**
**Ottawa (Ontario)**
**K1A 0H3**

# Résumé

Le présent rapport sur l'état de l'environnement porte sur deux questions environnementales importantes associées au réchauffement atmosphérique global et à l'appauvrissement de la couche d'ozone atmosphérique.

Le rapport commence par une évaluation de l'influence naturelle de l'atmosphère sur le climat terrestre et de la réaction du climat dans le passé. La présence naturelle de gaz à effet de serre tels que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux dans l'atmosphère est d'une importance particulière. L'étude des climats anciens montre une forte corrélation entre les variations de température à long terme et la concentration de ces gaz dans l'atmosphère. Avec l'avènement de la révolution industrielle, les concentrations ont augmenté pour atteindre des niveaux sans précédents et posé des inquiétudes à la communauté scientifique sur la possibilité de changements rapides et dramatiques du climat global.

Les modèles numériques des processus climatiques indiquent qu'un doublement du niveau de dioxyde de carbone de l'ère préindustrielle entraînerait une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre de 1,5 à 4,5 °C. Un tel réchauffement, associé à des changements inévitables des configurations de précipitations, provoquerait des perturbations sur une grande échelle des écosystèmes naturels et demanderait une adaptation radicale des sociétés humaines et de la faune.

La deuxième partie du rapport étudie l'appauvrissement possible de la couche protectrice d'ozone de la haute atmosphère. L'émission de produits chimiques industriels d'une durée de vie très longue tels que les CFC semble accélérer l'appauvrissement de l'ozone atmosphérique. Une réduction globale nette des concentrations d'ozone total de plusieurs pourcents a déjà été observée dans les dernières décennies par exemple, les diminutions saisonnières de plus de 50 % au-dessus de l'Antarctique au cours des dernières années. Si les concentrations d'ozone continuent à diminuer, une augmentation marquée du rayonnement solaire ultraviolet nocif à la surface de la Terre aura des incidences désastreuses sur la santé humaine et animale, la végétation et les matériaux.

Enfin, le rapport considère les liens entre ces deux questions, d'autres problèmes de pollution atmosphérique et le comportement humain; il examine les réponses actuelles et futures, tant à l'étranger qu'au Canada.

# Table des matières


Liste des figures ..... 7
Liste des tableaux ..... 8
Remerciements ..... 9
Préface ..... 11

*Chapitre 1*
**Le climat naturel de la Terre** **13**
Le système climatique naturel de la planète ..... 13
*Le moteur thermique de la planète* ..... 13
*Le rayonnement solaire descendant* ..... 14
*Le rayonnement thermique ascendant* ..... 15
L'équilibre climatique ..... 15
Les climats du passé ..... 16
*La reconstitution du climat* ..... 16
*Le dernier million d'années* ..... 19
*Le dernier millénaire* ..... 20
*Les climats passés du Canada* ..... 20
Le changement climatique au Canada ..... 22

*Chapitre 2*
**Le renforcement de l'effet de serre** **25**
Le dioxyde de carbone ..... 25
Le méthane ..... 28
Les autres gaz à effet de serre ..... 29
Les autres influences humaines ..... 29
Les gaz à effet de serre : une comparaison ..... 30

*Chapitre 3*
**La prévision du changement climatique** **33**
Les modèles mathématiques du climat ..... 33
Le MCG canadien ..... 34
Les résultats des expériences avec les modèles ..... 35
La Terre se réchauffe-t-elle? ..... 37

*Chapitre 4*
**Une planète plus chaude** **39**
Les écosystèmes naturels ..... 39
L'agriculture ..... 40
Les régions côtières ..... 40
Les autres impacts ..... 41
Le dioxyde de carbone et les plantes ..... 42
Les implications pour la sécurité du globe ..... 42

*Chapitre 5*

**Un Canada plus chaud** **45**

Les forêts ..... 45
L'agriculture ..... 46
Les ressources en eau ..... 48
La neige et la glace ..... 49
L'inondation des côtes ..... 50
Les autres impacts ..... 50
Le changement climatique et les phénomènes extrêmes ..... 51

*Chapitre 6*

**L'appauvrissement de la couche d'ozone** **53**

La chimie de la couche d'ozone ..... 53
Les altérations dans la couche d'ozone ..... 53
La mesure des concentrations d'ozone ..... 56
Les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone ..... 57

*Chapitre 7*

**Comment faisons-nous face?** **59**

Comment faire face aux incertitudes scientifiques ..... 59
Vers un accord international ..... 60
La réaction à l'échelle planétaire ..... 61
La réaction du Canada ..... 63
Le Plan vert et le réchauffement global ..... 64
Le rôle des citoyens ..... 65

**Protéger l'atmosphère : un devoir personnel** **66**

**Sources des figures et des tableaux** **68**

**Quelques ouvrages utiles** **69**

**Liste des rapports sur l'état de l'environnement** **70**

## Liste des figures


Figure 1. Flux d'énergie du système climatique global ..... 14
Figure 2. Circulation atmosphérique générale ..... 16
Figure 3. Configurations des courants océaniques ..... 17
Figure 4. Distribution annuelle globale des précipitations ..... 17
Figure 5. Éléments principaux influant sur le système climatique global ..... 18
Figure 6. Écarts des températures moyennes annuelles du dernier million d'années ..... 19
Figure 7. Comparaison des températures locales et des concentrations atmosphériques de méthane et de dioxyde de carbone dans l'Antarctique durant les 160 000 dernières années ..... 20
Figure 8. Effets des variations des concentrations atmosphériques d'aérosols sur la transmission de la lumière ..... 21
Figure 9. Écarts de la température moyenne annuelle globale en surface, entre 1860 et 1989, des moyennes de 1950-1979 ..... 21
Figure 10. Estimation de l'augmentation des températures en Amérique du Nord durant le sommet chaud de l'Holocène, il y a 6 000 ans ..... 23
Figure 11. Conditions dans l'Arctique pendant l'épisode médiéval chaud, il y a 1 000 ans ..... 23
Figure 12. Tendances globales et canadiennes des températures de surface depuis 1860 ..... 24
Figure 13. Tendances des températures dans le sud du Canada ..... 24
Figure 14. Variations des concentrations de méthane atmosphérique durant les 200 dernières années ..... 25
Figure 15. Cycle du carbone global ..... 26
Figure 16. Contenu en carbone des émissions annuelles globales de dioxyde de carbone provenant des combustibles fossiles et de la production de ciment, 1860 à 1988 ..... 26
Figure 17. Distribution régionale des émissions de dioxyde de carbone provenant des combustibles fossiles, 1950 et 1987 ..... 27
Figure 18. Concentrations de dioxyde de carbone atmosphérique ..... 27
Figure 19. Projections des concentrations futures de dioxyde de carbone atmosphérique ..... 28
Figure 20. Estimation de la contribution de diverses sources aux émissions globales totales de méthane ..... 29
Figure 21. Principaux éléments d'un modèle de circulation générale ..... 35
Figure 22. Tendances des températures globales prévues par les modèles et observées ..... 37
Figure 23. Taux estimés de l'élévation du niveau des océans jusqu'en 2100 ..... 40
Figure 24. Effets de l'élévation du niveau de l'océan sur les côtes du Bangladesh ..... 41
Figure 25. Modifications des limites des forêts et des prairies dues à un doublement du $CO_2$ ..... 46
Figure 26. Nombre moyen de feux de forêt et d'étendues forestières brûlées par année (par décennie) ..... 46
Figure 27. Augmentation possible des terres agricoles par suite du réchauffement global ..... 47
Figure 28. Effets possibles du réchauffement climatique sur l'humidité du sol dans le sud de la Saskatchewan ..... 48
Figure 29. Effets d'une élévation de 1 m du niveau de l'océan sur les inondations à Charlottetown ..... 50
Figure 30. Distribution verticale de l'ozone dans l'atmosphère ..... 53
Figure 31. Distribution globale moyenne d'ozone naturel ..... 54
Figure 32. Quantités d'ozone total au-dessus de Halley Bay, Antarctique, 1956 à 1985 ..... 54
Figure 33. Ozone total au-dessus de de la région du Pôle Nord en mars 1986 ..... 55
Figure 34. Destruction de l'ozone par des catalyseurs ..... 55
Figure 35. Taux de mortalité due aux cancers de type mélanome associés à la latitude ..... 57

## Liste des tableaux

Tableau 1. Concentration de divers gaz dans l'air sec ..... 14
Tableau 2. Résultats d'expériences d'un doublement du $CO_2$ ..... 36
Tableau 3. Fréquence de bas niveaux d'eau dans les Grands Lacs ..... 49
Tableau 4. Durée de la saison de ski en Ontario et au Québec ..... 50

# Remerciements

Tout au cours de la longue préparation de ce rapport, l'auteur a continuellement profité des idées, des conseils et de l'appui de ses collègues et de l'administration du Service de l'environnement atmosphérique. Les critiques de T. Allsopp, L. Anderson, B. Atkinson, J.-P. Blanchet, G. Boer, S. Cohen, R. Daley, K. Dawson, E. Dowdeswell, P. Galbraith, M. Jean, J. Kerr, P. Kertland, A. Malinauskas, H. Mackey, A. Manson, R. Street, G. Vigeant et D. Wardle ont été particulièrement appréciées. Des remerciements spéciaux s'adressent aussi aux critiques, collaborateurs et conseillers de l'extérieur : J. Doucet (étudiant, 1989), G. McKay (expert-conseil), K. Millyard (Amis de la Terre), J. Séguin et W. Simpson-Lewis (Direction de l'état de l'environnement).

L'auteur est redevable au rédacteur du rapport, David Francis, qui a transformé un document scientifique en un rapport qui peut être compris par tous et chacun; il a aussi apporté son aide à la préparation finale; à Gilles Tardif pour la révision finale du texte français; et à Image One Productions pour la qualité de leurs graphiques. P. Burke, U. Ellis et N. Khaja ont fait preuve de beaucoup de patience lors du traitement de texte des nombreuses versions et méritent notre reconnaissance.

Pour terminer, l'auteur tient à exprimer sa gratitude envers le Groupe de recherche et de développement énergétiques pour son aide financière à l'élaboration de ce rapport.

# Préface

À ce que nous savons, notre atmosphère est seule à pouvoir assurer la vie. Elle apporte l'oxygène, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone nécessaires au maintien des processus biologiques à l'intérieur de l'écosystème de la surface terrestre. Elle contient en haute altitude une couche d'ozone protectrice qui joue le rôle d'écran contre le rayonnement ultraviolet du soleil. De plus, ses composants comprennent des gaz qui servent de couverture isolante autour de la planète en maintenant à la surface l'amplitude thermique nécessaire à la présence d'eau liquide et par conséquent de vie. Chacun de ces facteurs est essentiel à l'existence des êtres vivants, et tous persistent depuis des centaines de milliers, peut-être des millions, d'années.

Les scientifiques ont reconnu depuis longtemps l'importance de l'atmosphère terrestre. Toutefois, ce n'est pas avant la fin des années 1960 qu'on nous a présenté les premières et bouleversantes images de la Terre vue de l'espace. Ces images montrent une oasis remarquable de bleu et de blanc, dans l'immensité d'un cosmos sans vie — une oasis protégée par une mince et fragile couche de gaz. C'était une façon saisissante de nous rappeler que la Terre peut en effet être unique et irremplaçable. Neil Armstrong, le premier être humain, en juillet 1969, à poser le pied sur la Lune fait remarquer que quand on regarde la Terre de cette distance, son atmosphère ne se voit tout simplement pas... On va devoir se rendre à l'évidence qu'il faut absolument apprendre à conserver cette atmosphère et à l'utiliser judicieusement.

Si la remarque d'Armstrong était appropriée à l'époque, elle l'est encore bien davantage maintenant. Il est de plus en plus clair, scientifiquement parlant, que l'atmosphère terrestre subit des changements majeurs. Ces changements ont à certains égards déjà dépassé les limites des fluctuations atmosphériques naturelles des 100 000 dernières années au moins, et l'on prévoit qu'ils deviendront encore plus importants avec le temps. Ils semblent directement liés non à une certaine force d'évolution externe à l'œuvre sur la planète, mais à une expérience géophysique à l'échelle du globe involontairement mise en route de l'intérieur par l'humanité, une expérience incontrôlée qui pourrait modifier l'écosystème terrestre bien au-delà de ce que le globe a connu au cours de plusieurs centaines de milliers d'années.

Cette expérience est la conséquence de deux facteurs : le progrès technologique rapide et une explosion démographique sans précédent, qui ont tous deux débuté au XVIII$^{e}$ siècle. Les progrès technologiques, avec l'utilisation des nouvelles formes d'énergie et la multiplication de la capacité de production, ont grandement accru l'impact de l'activité humaine sur le milieu, non seulement par une plus grande consommation des ressources mais également par la production de vastes quantités de produits et de sous-produits dommageables à l'environnement. La croissance démographique du globe, d'environ 600 millions d'habitants au début du XVIII$^{e}$ siècle à plus de 5 milliards aujourd'hui, s'est ajoutée à ces effets avec le résultat que l'activité humaine atteint maintenant un point tel qu'elle peut rivaliser d'influence sur le milieu avec les forces de la nature.

Ces phénomènes s'accompagnent de changements rapides dans l'utilisation des terres, d'une industrialisation croissante et d'un insatiable appétit d'énergie. Certaines conséquences de ces progrès : smog, pollution de l'eau, appauvrissement et contamination du sol, sont déjà malheureusement évidentes à l'échelle locale et régionale et ont fait, dans de nombreux pays, l'objet d'une vigoureuse législation antipollution. Toutefois, les conséquences à l'échelle du globe ont été beaucoup plus insidieuses; les dommages sont causés par le rejet artificiel dans l'atmosphère de gaz pour la plupart inodores et invisibles — substances apparemment inoffensives, dont les effets ne sont pas immédiatement perceptibles. C'est tout récemment seulement que nous avons reconnu que l'émission de ces gaz peut modifier la composition de l'atmosphère. Étant donné que celle-ci est le système le plus essentiel au maintien de la vie sur la Terre, ces modifications auront inévitablement des incidences majeures sur la biosphère.

Les changements de la composition atmosphérique qui se produisent actuellement soulèvent deux inquiétudes fondamentales. La première concerne l'appauvrissement progressif de la couche protectrice d'ozone de la stratosphère. L'autre, porte sur le réchauffement de la surface terrestre et de la troposphère. Ces questions font l'objet du présent rapport, dont le but est de résumer notre compréhension scientifique actuelle des processus en action dans ces changements et de leurs conséquences sur l'écosystème du globe, la communauté internationale et le Canada.

Les chapitres 1 à 4 présentent l'état actuel de la connaissance scientifique du réchauffement atmosphérique et du changement climatique et de leurs effets possibles sur la planète. Les données proviennent avant tout du rapport du Groupe d'experts intergouvernemental pour l'étude du

changement climatique (IPCC) paru en août 1990. Ce rapport représente le plus récent accord général de la communauté scientifique internationale sur le réchauffement du globe et le changement climatique.

Le chapitre 5 examine les nombreuses conséquences possibles d'un climat plus chaud sur le Canada; le chapitre 6 étudie l'appauvrissement de la couche d'ozone; et, pour conclure, le chapitre 7 considère le lien entre tous ces aspects du changement atmosphérique et examine ce qui peut être fait pour y réagir.

*Chapitre 1*

# Le climat naturel de la Terre

Par les gaz qui la composent, l'atmosphère assure les conditions essentielles à la vie sur la Terre. Mais c'est par son climat qu'elle façonne les configurations et établit les limites de l'existence terrestre. Le climat régit le cycle biologique des plantes et des animaux, influe sur leur croissance et leur vitalité et constitue le principal facteur qui détermine leur distribution sur la planète. Presque toutes les formes de vie complexes sont adaptées pour vivre dans une niche climatique précise et assez étroite.

Grâce à la technologie, les êtres humains sont parvenus à étendre leur niche de manière à y inclure presque toutes les parties du globe, quoique même la vie humaine reste étroitement tributaire des facteurs climatiques. Les types de colonisation, les abris, les habitudes vestimentaires, l'agriculture, le transport et même la culture, reflètent tous l'influence extrêmement profonde du climat.

Le climat s'évalue à partir des conditions météorologiques moyennes. Donc, le climat d'un lieu représente la moyenne sur un certain nombre d'années des variations quotidiennes de température, de précipitation, de nébulosité, de vent et d'autres conditions atmosphériques qui s'y produisent normalement. Mais le climat est davantage que la simple somme de ces valeurs moyennes. Il se définit aussi par la variabilité de chaque élément climatique, comme la température ou la précipitation, et par la fréquence à laquelle se produisent différents types de conditions atmosphériques. En fait, tout facteur caractéristique du régime météorologique d'un lieu en particulier ressortit à son climat.

Bien que la notion de climat suppose en soi une continuité et une stabilité à long terme de ces configurations, le climat n'en demeure pas moins un phénomène variable. L'ordre du changement peut être faible et relativement court : ici, un hiver anormalement froid; là, un été chaud. Ou, comme les grandes époques glaciaires dont l'apparition et la disparition ont pris des milliers d'années, le changement peut se produire à l'échelle de l'immensité géologique.

Nous fixerons notre attention sur les changements auxquels on peut s'attendre pendant les quelques décennies et siècles à venir, étant donné que c'est dans ce laps de temps relativement court que les premiers effets majeurs du réchauffement terrestre se feront probablement sentir. Mais, pour comprendre comment se manifesteront ces changements, nous devons aussi étendre la période considérée et examiner une longue liste de changements climatiques passés. C'est à partir de cette observation que nous pouvons mieux comprendre la variabilité naturelle du climat terrestre et les processus qui entrent en jeu dans ses fluctuations souvent spectaculaires. Toutefois, nous devons auparavant considérer les forces physiques qui régissent le flux d'énergie atmosphérique, car ce sont elles qui en dernier ressort déterminent les principales caractéristiques du climat de notre planète.

## Le système climatique naturel de la planète

### Le moteur thermique de la planète

Très simplement, on peut considérer le système climatique terrestre comme une gigantesque machine thermique activée par l'énergie dispensée par le soleil. À mesure que cette énergie y circule, elle réchauffe la Terre et l'air qui l'entoure, mettant ainsi en mouvement les vents atmosphériques, les courants océaniques et les processus d'évaporation et de précipitation du cycle de l'eau. Ces mouvements et processus se traduisent par les conditions météorologiques et donc par le climat.

Toute l'énergie qui entre dans le système climatique finit par en sortir pour retourner dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. Tant que cette énergie repart au même rythme qu'elle arrive, notre moteur thermique atmosphérique reste en équilibre et la température terrestre moyenne demeure constante. Cependant, si le rythme auquel l'énergie pénètre dans le système ou en ressort varie, l'équilibre se rompt et les températures globales se modifient jusqu'à ce que le système s'adapte de lui-même et atteigne un nouvel équilibre.

Le flux d'énergie circulant dans le système est régulé par certains gaz de l'atmosphère. Toutefois, aussi surprenant que cela puisse paraître, les plus importants composants atmosphériques n'ont que peu sinon pas de rôle à jouer dans ce processus. Bien que l'atmosphère soit composée à 99 % d'azote et d'oxygène (tabl. 1), ces gaz sont relativement transparents au rayonnement et n'ont guère d'effet sur l'énergie qui les traverse. C'est le reste qui joue le principal rôle en régulant les flux énergétiques qui déterminent les

**Tableau 1**
**Concentration de divers gaz dans l'air sec (% du volume total)**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Azote | 78,1 | Hélium | 0,0005 |
| Oxygène | 20,9 | Méthane | 0,00017 |
| Argon | 0,9 | Hydrogène | 0,00005 |
| Dioxyde de carbone | 0,035 | Oxyde nitreux | 0,00003 |
| Néon | 0,0018 | Ozone | variable |

SOURCE : Liou, 1980.

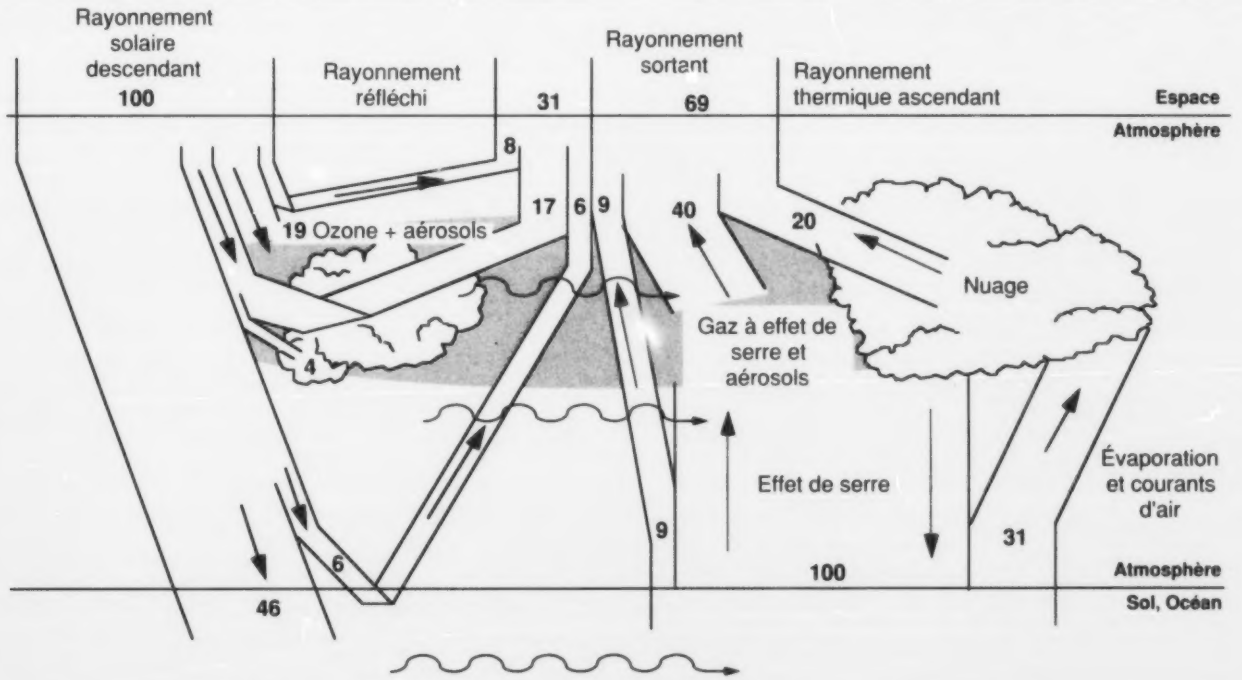
processus climatiques. Cette fraction de 1 % se compose d'une variété d'aérosols et de gaz qui reflètent, absorbent et réémettent d'importantes quantités de rayonnement solaire descendant et d'énergie thermique ascendante.

## Le rayonnement solaire descendant

La figure 1 montre ce qui arrive au rayonnement solaire lorsqu'il pénètre dans l'atmosphère. Seulement la moitié environ de ce rayonnement est réellement absorbée par la surface terrestre. L'autre moitié est déroutée ou interceptée de différentes façons par les agents décrits ci-dessous.

*Gaz à l'état de traces.* Les gaz mineurs de l'air pour la plupart n'exercent pas d'influence importante sur la transmission de la lumière solaire. Cependant, l'ozone est la principale exception à cette règle. En absorbant les rayons ultraviolets de l'énergie solaire descendante, la couche d'ozone non seulement protège l'écosystème terrestre contre les effets nuisibles de ce rayonnement, mais elle retient également une portion de l'énergie solaire dans la haute atmosphère.

**Figure 1**
**Flux d'énergie du système climatique global**




SOURCE : MacCracken et Luther, 1985.

Ce diagramme décrit le flux de 100 unités d'énergie solaire à travers un système climatique en équilibre. L'effet de serre ralentit le départ d'une importante partie de cette énergie et, de ce fait, le réchauffement de la surface terrestre s'intensifie. Pour cette raison, la surface émet beaucoup plus d'énergie (140 unités) qu'elle en absorbe directement du soleil (46 unités). Le système présenté étant en équilibre, les 100 unités d'énergie incidente sont éventuellement retournées à l'espace.

*Aérosols.* Ce sont de très fines particules et gouttelettes, suffisamment petites pour rester en suspension dans l'atmosphère pendant des périodes de durée considérable. Ils se composent de minuscules gouttelettes d'acide sulfurique des éruptions volcaniques, de suie des feux de surface, de sel des embruns marins et de poussière. Ils reflètent et absorbent à la fois le rayonnement solaire descendant, et ce proportionnellement à leur abondance et à leur réflectivité. On estime qu'environ 8 % du rayonnement solaire descendant est réfléchi ou rétrodiffusé dans l'espace par les aérosols. Toutefois, avec l'ozone, ces derniers absorbent et donc retiennent dans l'atmosphère une partie supplémentaire de 19 % de l'énergie descendante.

*Nuages.* Les gouttelettes d'eau contenues dans les nuages ont un effet important sur l'énergie solaire descendante. Cela est dû en partie au fait que les nuages sont très nombreux dans la basse atmosphère et en partie au fait qu'ils ont un grand pouvoir réflectif. Ils réfléchissent donc une fraction supplémentaire de 17 % du rayonnement descendant, tout en en absorbant environ 4 %.

*Surface terrestre.* La surface terrestre comprend les océans, les écosystèmes comme les forêts et les déserts ainsi que les étendues de glace et de neige. Elle réfléchit environ 6 % de la lumière solaire qui entre dans l'atmosphère.

Sur la totalité du rayonnement solaire qui pénètre dans l'atmosphère, 31 % est réfléchi vers l'espace par les aérosols, les nuages et la surface terrestre, et par conséquent perdu pour le système climatique. Sur les 69 % qui restent pour alimenter le système, 23 % sont absorbés dans l'atmosphère et 46 % réchauffent les continents et les océans.

## Le rayonnement thermique ascendant

La surface terrestre et la basse atmosphère réchauffées par les rayons du soleil libèrent de nouveau cette chaleur en émettant du rayonnement infrarouge. À mesure qu'il se déplace vers l'espace, ce rayonnement rencontre deux obstacles atmosphériques majeurs : les nuages et les gaz absorbants.

*Nuages.* En plus de réfléchir le rayonnement solaire descendant, les nuages absorbent également de grandes quantités du rayonnement thermique ascendant. L'énergie absorbée par les nuages est réémise en grande partie vers la surface. C'est pour cette raison que l'air qui se trouve près de la surface terrestre est généralement beaucoup plus chaud par une nuit nuageuse que par temps clair. La quantité de rayonnement absorbé et réfléchi dépend de l'étendue, de l'épaisseur, de la hauteur et du type de nuages en cause.

*Gaz absorbants.* Un certain nombre des gaz naturels mineurs, qui se trouvent dans l'atmosphère, bien qu'assez transparents à la lumière solaire, absorbent la plus grande partie de l'énergie thermique infrarouge transmise par la Terre vers l'espace. Cette énergie est alors réémise dans toutes les directions : une partie vers la surface et une vers le haut où d'autres molécules peuvent l'absorber de nouveau. Enfin, les molécules absorbantes de la haute atmosphère émettent directement l'énergie dans l'espace. Ces gaz rendent donc l'atmosphère opaque au rayonnement ascendant, de la même manière qu'un verre opaque freine la transmission de lumière visible. De concert avec les nuages, ils forment une couche isolante autour de la Terre et lui conservent sa chaleur. C'est parce qu'une serre retient la chaleur à peu près de la même manière que ce phénomène a été baptisé «effet de serre» et que les gaz absorbants qui en sont la cause s'appellent «gaz à effet de serre». Les importants gaz à effet de serre produits naturellement comprennent la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone et l'oxyde nitreux.

L'ampleur de l'effet de serre naturel peut être estimée bien simplement. En théorie, l'énergie solaire qui atteint la Terre est suffisante pour permettre une température moyenne de –18 °C à la surface, pas plus. Toutefois, nous savons d'après les mesures réelles que la température moyenne de la surface est plus proche de 15 °C, soit 33 °C de plus. Ce réchauffement additionnel, résultat de l'effet de serre, est suffisant pour faire la différence entre une planète, la Terre, où la vie est possible et une autre, la Lune, où elle ne l'est pas.

## L'équilibre climatique

Somme toute, le climat dépend de la manière dont l'atmosphère redistribue l'énergie thermique fournie par le soleil et absorbée par la Terre. Étant donné que l'intensité du rayonnement solaire varie avec la latitude, toutes les parties de la planète ne sont pas réchauffées également. Cet effet est plus prononcé sous les tropiques, où l'énergie reçue du soleil est plus grande que celle qui est renvoyée dans l'espace. Les températures y sont donc beaucoup plus élevées que la moyenne globale et demeurent de façon constante à quelques degrés près autour de 30 °C. À l'opposé, les régions polaires connaissent une perte nette d'énergie vers l'espace et les températures peuvent varier entre des maximums de près de 20 °C pendant l'été polaire de l'hémisphère Nord et des minimums bien en deçà de –60 °C pendant l'hiver polaire de l'hémisphère Sud.

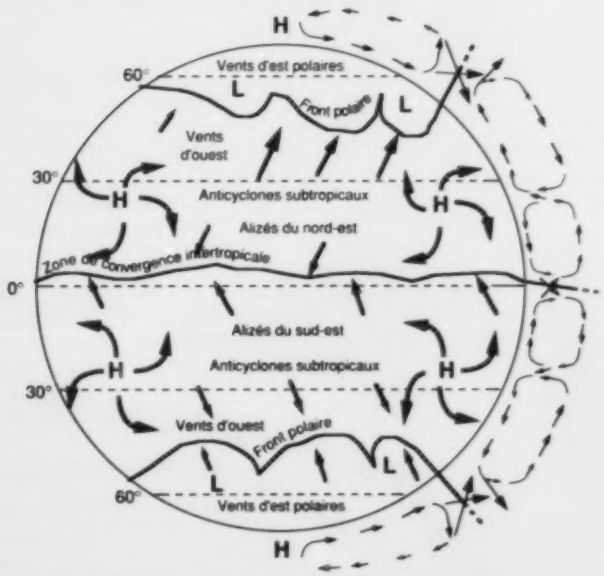
Cette grande différence de température entre les tropiques et les pôles constitue le principal moteur des

courants océaniques et des vents atmosphériques. Essentiellement, ceux-ci transportent l'eau et l'air chauds de l'équateur vers les pôles tandis que l'eau et l'air froids se déplacent en direction contraire. Toutefois, ce flux est modifié par la rotation de la Terre et les effets des masses terrestres qui produisent un réseau complexe de courants. Ces derniers sont présentés sous forme simplifiée dans les figures 2 et 3.

Étant donné que l'humidité de l'air est transportée par les courants aériens, la configuration des précipitations est aussi influencée par la circulation atmosphérique globale. Mais les courants océaniques, le relief et l'évaporation au-dessus des continents exercent eux aussi une très forte influence. Il s'ensuit que la distribution des précipitations autour du globe présente une configuration même plus complexe que la circulation atmosphérique (fig.4). Certaines régions reçoivent donc de considérables surplus de pluie, favorables aux écosystèmes riches et luxuriants, tandis que d'autres n'en reçoivent pas assez pour nourrir la végétation et deviennent désertiques.

De nombreux autres facteurs peuvent aussi influer sur le climat terrestre. En plus de la circulation de l'air et des courants océaniques, on doit également considérer les effets des nuages et des énormes étendues de neige et de glace, l'influence de la topographie, des sols et de la végétation ainsi que l'impact des processus et des activités qui se déroulent dans la biosphère. À cela il convient d'ajouter l'effet des différences dans le réchauffement solaire, non seulement entre les régions mais aussi entre les saisons, et même entre la nuit et le jour.

**Figure 2**
**Circulation atmosphérique générale**




SOURCE : Critchfield, 1983.

Tous ces éléments constituent les parties interreliées et interactives d'un système équilibré (fig. 5). Si un changement dans l'un d'eux vient perturber cet équilibre, il entraînera probablement des réactions complexes dans les autres éléments à mesure que le système s'adapte pour trouver un nouvel équilibre. Certaines de ces réactions peuvent accentuer le changement initial *(rétroaction positive)*, tandis que d'autres peuvent s'y opposer et le contrebalancer en partie *(rétroaction négative)*. Étant donné que le système climatique est régi par le rayonnement solaire, tout ce qui vient modifier la quantité d'énergie solaire qu'il absorbe ou la quantité nette d'énergie thermique qu'il libère entraînera des changements climatiques. Ces changements permettront au système de s'adapter jusqu'à ce que l'équilibre net entre l'énergie descendante et l'énergie ascendante soit une fois de plus rétabli.

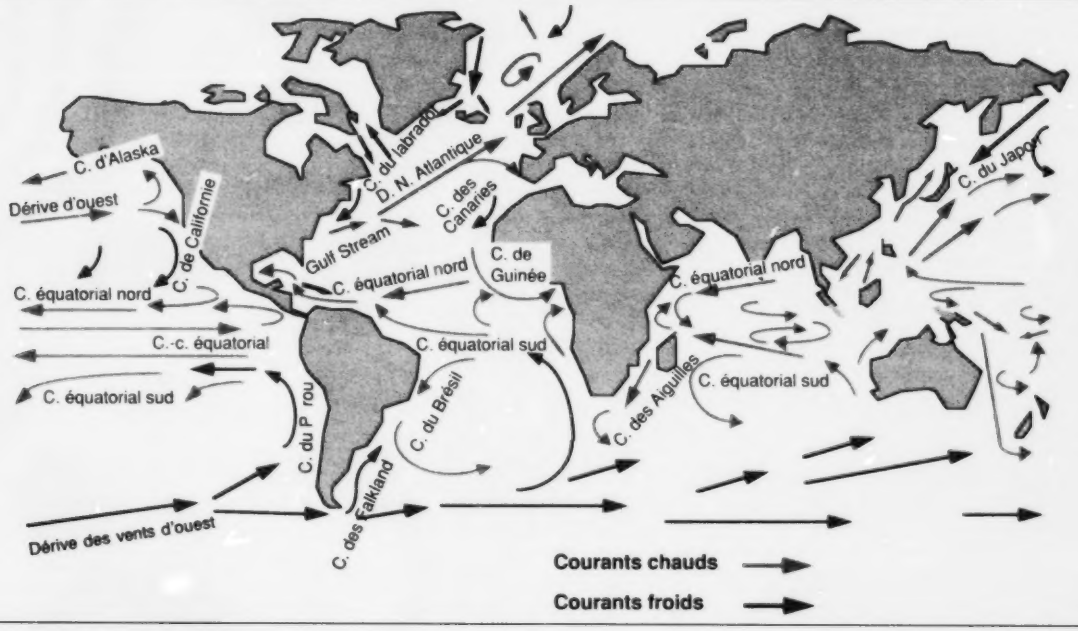
Parmi les principales causes possibles de ces changements, on peut mentionner les variations dans la teneur en aérosols et en gaz de l'atmosphère, les changements dans la réflectivité de la surface terrestre et les changements d'intensité de la lumière solaire atteignant l'atmosphère. Il est clair, selon les études sur le climat du passé, que ces modifications se produisent sans cesse — chronologiquement sur des échelles allant de quelques mois à des millions d'années, et géographiquement à des échelles tant régionales que globales. Cependant, la reconstitution des configurations de températures indique que ces fluctuations naturelles, tout en étant suffisantes pour causer des bouleversements considérables dans les écosystèmes terrestres, sont toujours demeurées dans l'étroite plage nécessaire au maintien de la vie sur la planète.

## Les climats du passé

### La reconstitution du climat

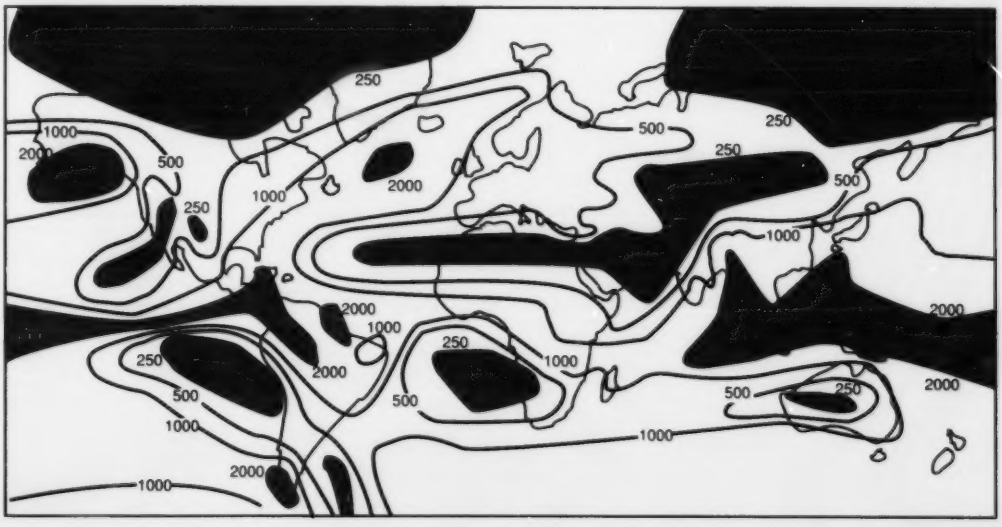
Le système climatique naturel de la Terre est en fait en perpétuelle évolution : c'est un système dynamique. Des forces, tant extérieures qu'intérieures, sont constamment à l'œuvre pour modifier le fragile équilibre existant au sein de ses composants et entre eux. Les informations tirées des sédiments terrestres, marins et lacustres, des calottes glaciaires et même de la végétation attestent clairement que des changements majeurs dans le climat du globe se sont produits dans le passé. Elles laissent aussi penser que de tels changements se produiront probablement de nouveau et de manière naturelle dans l'avenir.

**Figure 3**
**Configurations des courants océaniques**




SOURCE : Griffiths et Driscoll, 1982.

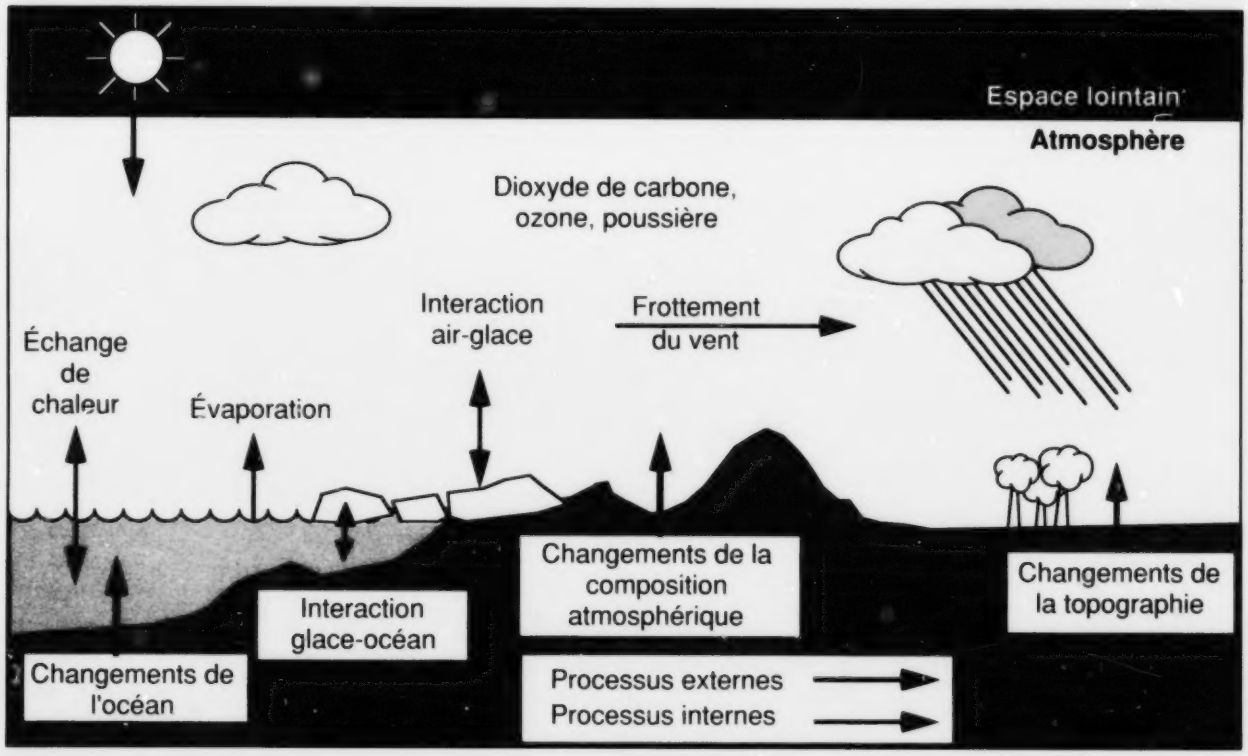
**Figure 4**
**Distribution annuelle globale des précipitations (mm)**




SOURCE : Lockwood, 1974.

Les zones ombragées indiquent les extrêmes : gris, moins de 250 mm; bleu pâle, plus de 2 000 mm; et bleu foncé, plus de 3 000 mm.

**Figure 5**
**Éléments principaux influant sur le système climatique global**




SOURCE : McKay et Hengeveld, 1990.

Nos renseignements les plus précis sur les climats du passé proviennent des données recueillies scientifiquement au cours des 100 ou 150 dernières années. Consignées par des observateurs compétents à l'aide d'instruments de précision, ces données sont non seulement relativement fiables mais aussi très complètes et renferment des variations des conditions quotidiennes et même horaires dans presque toutes les régions habitées du globe. C'est parce qu'elles sont si détaillées que ces «archives» constituent une base de données extrêmement utile à l'identification et à l'analyse des configurations climatiques récentes et même de leurs fluctuations relativement faibles.

Pour étudier de plus grandes variations climatiques sur de plus longues périodes, les scientifiques doivent avoir recours à des sources de données substitutives, c'est-à-dire des preuves indirectes grâce auxquelles ils peuvent déduire ou démontrer la nature des climats passés. La mention de conditions météorologiques, notamment pour des régions comme l'Europe et l'Asie où il existe de nombreux documents écrits, peut servir utilement de base à l'analyse du climat du dernier millénaire. Bien qu'ils ne contiennent pas des données quantitatives fiables comme les registres récents, ces documents peuvent néanmoins apporter des renseignements qualitatifs considérables sur le climat du passé.

Cependant, quand on remonte au-delà du dernier millénaire, la reconstitution historique du climat doit avant tout s'appuyer sur les abondants indicateurs paléoclimatiques que la Terre elle-même met à notre disposition. Les pollens des plantes déposés dans les anciens marais, les sédiments des fonds lacustres et même les calottes glaciaires peuvent témoigner de la nature des saisons de croissance à l'époque du dépôt. Les restes des formes de vie aquatiques sont des témoins de la température de l'eau et de sa qualité dans le passé. Les vieilles plages indiquent les anciennes lignes de rivage et par conséquent le niveau de la mer. Même les bulles d'air fossilisées à l'intérieur des calottes glaciaires

congelées des régions polaires nous révèlent la composition et les températures des anciennes masses d'air. Les anneaux annuels des arbres, la composition et la structure du sol ainsi que le profil thermique de la croûte terrestre racontent eux aussi l'histoire à leur manière. Partant de cet assortiment d'indices variés et épars, les paléoscientifiques ont fourni suffisamment de renseignements pour nous permettre de dresser un tableau relativement continu, bien que qualitatif, des configurations de température à la surface du globe au cours du dernier million d'années.

## Le dernier million d'années

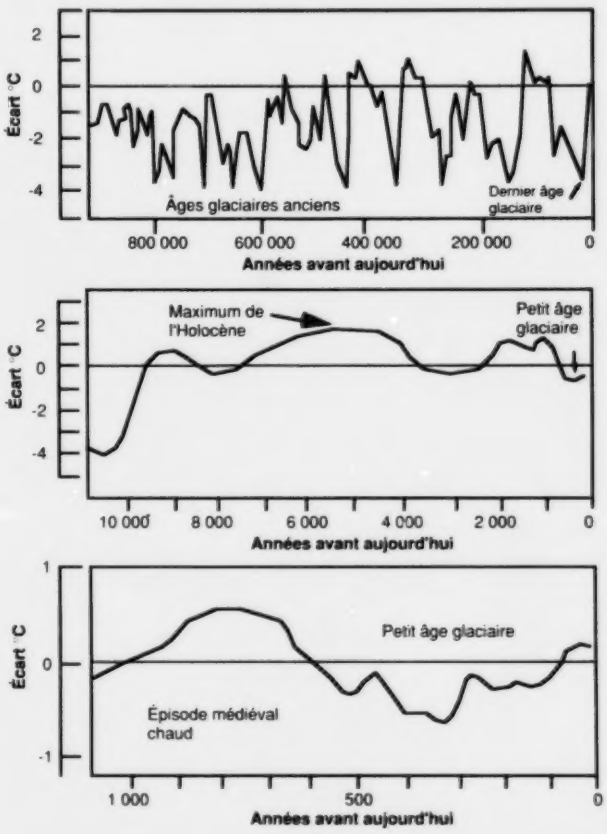
Il convient d'être prudent dans l'interprétation des archives reconstituées des climats anciens, car elles reposent sur différents indicateurs de fiabilité variable. Toutefois, on peut en tirer des renseignements utiles sur les principales configurations, avec de plus en plus de détails à mesure qu'on va vers le présent.

On peut se faire une idée, à partir de la figure 6a, de l'histoire du climat terrestre durant le dernier million d'années. Les températures pendant une grande partie de cette période semblent avoir suivi un cycle de variations à long terme presque périodiques. Les températures minimales extrêmes, correspondant aux grandes glaciations, semblent s'être produites à des intervalles d'environ 100 000 ans au cours des 800 000 dernières années. Chacun de ces épisodes glaciaires a été suivi d'un réchauffement marqué, de 4 à 6 °C, menant à une phase interglaciaire. Pendant ce cycle de 100 000 ans, de petites anomalies se sont manifestées à des intervalles d'environ 20 000 et 40 000 ans.

La figure 6b présente des tendances de températures plus détaillées pour les 10 000 dernières années. Elles ont atteint un sommet pendant l'actuelle période interglaciaire, il y a environ 5 000 ou 6 000 ans, et depuis ont graduellement baissé. Le sommet chaud des températures de l'interglaciaire est généralement appelé le maximum de l'Holocène. Plusieurs «petits âges glaciaires» ou épisodes de plus grand refroidissement semblent superposés à la tendance subséquente au refroidissement, à des intervalles d'à peu près 2 500 ans, le dernier s'étant produit entre les années 1400 et 1900 de notre ère. On croit que les températures moyennes globales que nous connaissons aujourd'hui sont pratiquement semblables à celles d'il y a 1 000 ans, soit environ 1 °C en dessous du maximum de l'Holocène et à peu près 1 à 2 °C de moins que pendant le dernier interglaciaire d'il y a 135 000 ans (fig. 6c).

On a avancé de nombreuses théories pour expliquer ces variations de températures. Selon une hypothèse qui compte beaucoup d'adeptes, les fluctuations aux 20 000 et aux 40 000 ans seraient liées aux changements dans l'orbite de la Terre autour du soleil. Cependant, les causes du cycle

**Figure 6**
**Écarts des températures moyennes annuelles du dernier million d'années**




SOURCE : Folland *et al.*, 1990.

Écarts des températures globales moyennes des valeurs actuelles : durant, a) le dernier million d'années; b) les derniers 10 000 ans; c) le dernier millénaire.

de 100 000 ans soulèvent encore de nombreuses controverses. Même si on voit une bonne correspondance avec le cycle de 100 000 ans de l'excentricité de l'orbite terrestre, l'ampleur des changements consécutifs dans le rayonnement solaire descendant est beaucoup trop faible pour expliquer les grands cycles glaciaire-interglaciaire.

Néanmoins, l'analyse récente des carottes de glace de l'Antarctique indique une grande corrélation entre les changements climatiques et la concentration naturelle dans l'atmosphère du dioxyde de carbone ($CO_2$) et du méthane ($CH_4$), deux importants gaz à effet de serre. Comme on peut

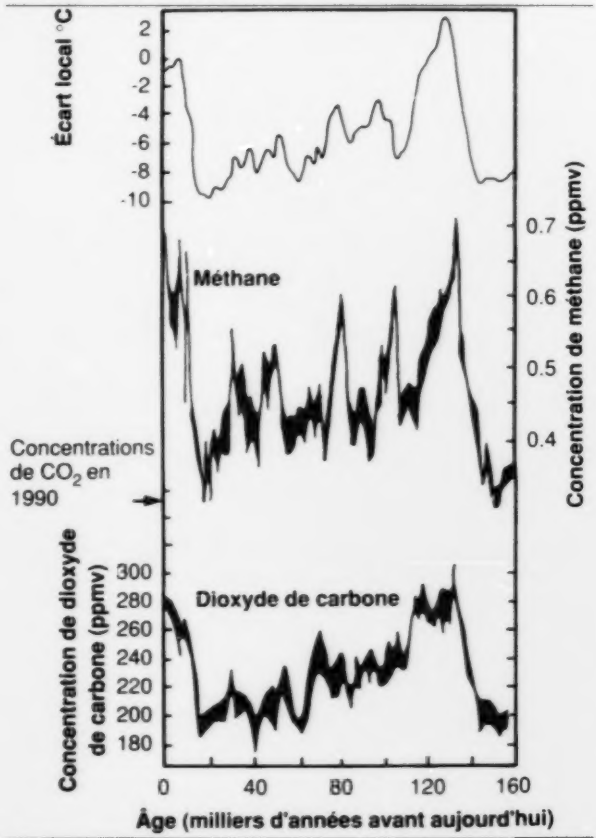
le voir dans la figure 7, la correspondance entre les concentrations de dioxyde de carbone et de méthane et les températures du pôle Sud pendant les 160 000 dernières années a été très étroite. Cette relation pourrait montrer que les changements extérieurs de l'équilibre énergétique de l'atmosphère peuvent être significativement augmentés par un très puissant mécanisme de rétroaction positive auquel participerait l'effet de serre.

## Le dernier millénaire

Pour ce qui est des fluctuations sur une plus courte échelle de temps, les efforts visant à établir une corrélation entre les cycles de rayonnement solaire et les configurations de températures, en particulier à des intervalles de 180 et de 80 ans, ont donné certains résultats encourageants. Toutefois, aucune des corrélations ne s'est encore avérée significative statistiquement parlant. Le facteur de forçage naturel du climat qui correspond le mieux aux récentes fluctuations de températures globales est la charge atmosphérique en poussière volcanique et en aérosols (fig. 8). Des modifications de cette charge peuvent contribuer notablement à la variabilité interannuelle de la température globale et avoir des effets à beaucoup plus long terme si elles durent longtemps.

La figure 9 présente une reconstitution détaillée et assez exacte des températures globales au cours du dernier siècle. En compilant ce registre, les chercheurs ont scrupuleusement tenu compte de l'influence exercée par la chaleur libérée par les villes (effet d'îlot thermique urbain) et ont ajouté des données provenant d'observations sur les océans. Bien que les premières décennies du siècle aient été nettement plus froides qu'aujourd'hui, les températures se sont élevées régulièrement pendant les années 1920 et 1930 pour atteindre un sommet au milieu des années 1940. Elles ont ensuite fléchi légèrement, et des valeurs un peu plus faibles ont prévalu jusque vers 1975. Depuis, la tendance au réchauffement a repris, les températures globales atteignant de nouveaux maximums dans les années 1980, période pendant laquelle on a enregistré les cinq années les plus chaudes des 100 dernières. À l'heure actuelle, la température moyenne de la surface terrestre est d'environ 0,5 °C supérieure à ce qu'elle était au XIX$^{e}$ siècle.

**Figure 7**
**Comparaison des températures locales et des concentrations atmosphériques de méthane et de dioxyde de carbone dans l'Antarctique durant les 160 000 dernières années**



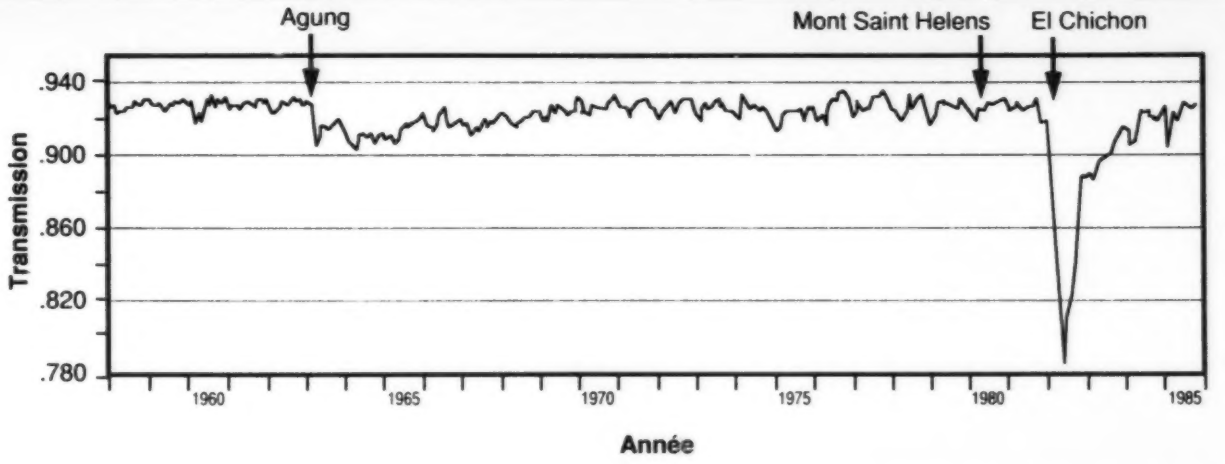

SOURCE : Houghton *et al.*, 1990.

La largeur du pointage indique la variabilité des données. Les températures sont comparées aux valeurs actuelles.

## Les climats passés du Canada

Pendant des milliers et millions d'années, les changements dans les tendances climatiques globales ont donné au Canada des climats extrêmement différents de ce que nous connaissons de nos jours. Nous pouvons, en examinant ces variations, replacer notre climat actuel dans son contexte et y trouver des indications sur la nature des changements futurs possibles. Le présent épisode interglaciaire — couvrant les 10 000 dernières années — est particulièrement utile à cet égard. L'examen des fossiles révèle que d'importantes variations climatiques se sont produites pendant cette période. Les registres historiques et les documents climatologiques des derniers siècles contiennent des preuves beaucoup plus détaillées des fluctuations récentes. Un regard jeté sur trois phases différentes de cette période — le maximum de l'Holocène il y 5 000 à 6 000 ans, le dernier millénaire et le dernier siècle — donne une idée de la variabilité naturelle du climat même pendant un épisode à long terme assez constant comme l'interglaciaire actuel.

**Figure 8**
**Effets des variations des concentrations atmosphériques d'aérosols sur la transmission de la lumière**

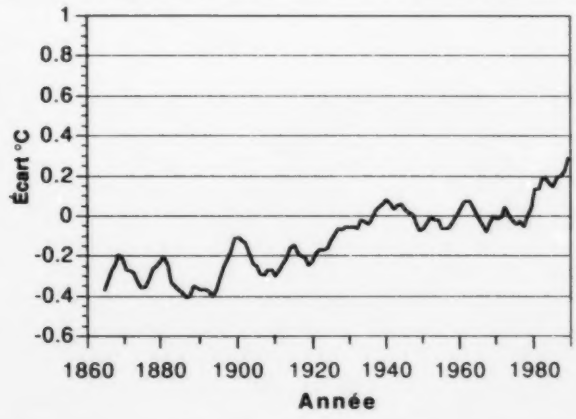



SOURCE : NOAA, 1989.

L'augmentation des concentrations atmosphériques d'aérosols diminue la quantité de rayonnement solaire transmis dans l'atmosphère. Le graphique montre les données sur la transmission de la lumière à l'observatoire de Mauna Loa, Hawaii, de 1958 à 1985. Il indique les importantes éruptions volcaniques qui ont eu lieu durant cette période.

*Maximum de l'Holocène.* Au sommet chaud du présent interglaciaire, le climat canadien semble avoir été plus chaud, plus sec et plus venteux qu'aujourd'hui. Selon les recherches, les hausses de températures estivales dans le sud du pays étaient relativement modestes, mais dans l'extrême Arctique elles étaient supérieures à 3 °C (fig. 10).

**Figure 9**
**Écarts de la température moyenne annuelle globale en surface, entre 1860 et 1989, des moyennes de 1950-1979**



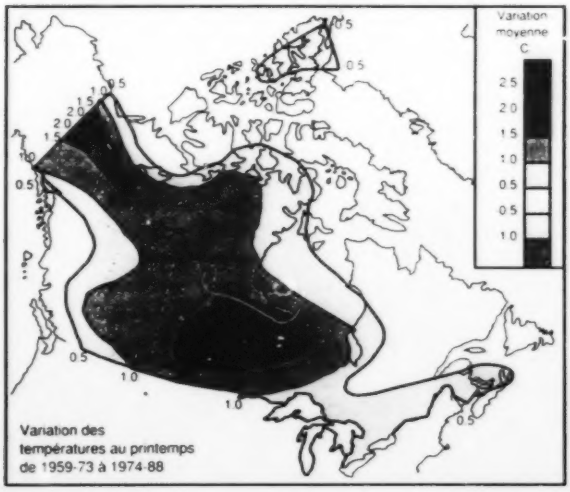

SOURCE : Boden *et al.*, 1990.

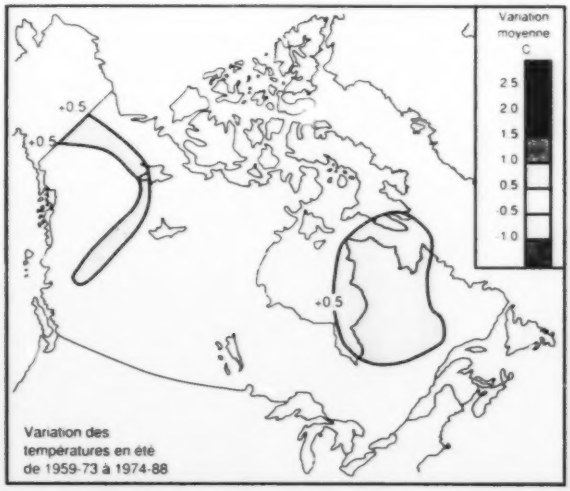
*Réchauffement médiéval.* Il semble que le climat de l'hémisphère Nord, il y a environ 1 000 ans, était à peu près identique à ce qu'il est de nos jours, mais nettement plus chaud (de 0,5 à 1 °C) qu'au cours de plusieurs siècles de l'intervalle. Cet épisode de chaleur ayant duré plusieurs centaines d'années, la ligne des arbres et d'autres limites naturelles de la végétation se sont graduellement déplacées vers le nord. Un climat plus doux dans l'Arctique a entraîné des diminutions substantielles de la couverture de glace de mer. Ces conditions peuvent avoir encouragé non seulement la migration des Inuit dans l'Arctique, mais aussi la venue et l'installation des Vikings en Islande et au Groenland (fig. 11). Les Vikings semblent avoir navigué sans encombre dans une grande partie de l'archipel canadien, et au Groenland ils ont pu se livrer à une agriculture viable. Ironie du sort, les efforts européens du XVII[e] au XIX[e] siècle dans le but de trouver le passage du nord-ouest vers l'Inde ont échoué principalement parce qu'ils ont débuté après que la période médiévale de réchauffement eut cédé la place à un «petit âge glaciaire» qui a duré à peu près de 1400 à 1900. Si seulement Franklin avait essayé six siècles plus tôt! Étant donné que les températures actuelles ressemblent à celles de l'épisode médiéval chaud, il est probable que la végétation et les régimes glaciels d'il y a 1 000 ans se produiront de nouveau si ces températures persistent.

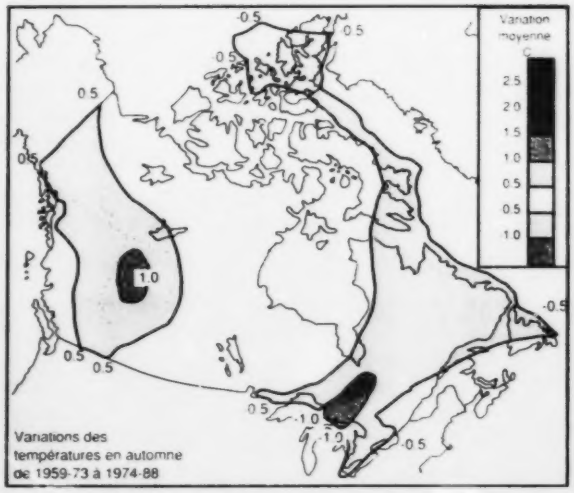
## Le changement climatique au Canada

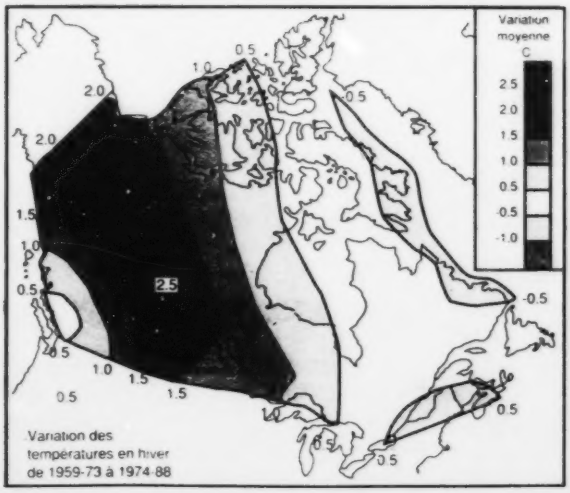
Bien que les tendances de la température moyenne globale, illustrées à la figure 9, indiquent que la planète dans son ensemble s'est réchauffée pendant le dernier siècle, le détail est plus compliqué. En fait, il existe parfois des différences substantielles entre les tendances de régions avoisinantes ou à différentes saisons de l'année.

Les cartes montrent comment les températures saisonnières moyennes de deux périodes de 15 ans (1959-1973 et 1974-1988) ont évolué dans différentes parties du pays. Pour l'été, les données ne présentent pas de différences marquées. Toutefois, l'hiver et le printemps affichent une large bande de réchauffement appréciable du sud des Prairies au Yukon et au secteur occidental des Territoires du Nord-Ouest, puis à l'Alaska. Cela contraste avec un léger refroidissement sur la partie nord-ouest du Labrador et les îles de l'Arctique. Ailleurs, on note peu de changements. Pendant l'automne, l'ouest du Canada connaît de nouveau un réchauffement important, tandis que dans l'est du pays la configuration de refroidissement devient plus étendue et plus intense, gagnant le Québec et l'Ontario.



**Ces cartes illustrent que, au niveau régional, la tendance globale vers des climats plus chauds a été modifiée par des changements dans la configuration saisonnière des vents. En modifiant le flux net des masses d'air froid et chaud dans différentes parties du pays, ces changements ont amplifié le réchauffement dans certaines régions et à certaines saisons et l'ont atténué dans d'autres cas. Voilà un bon moyen de nous rappeler que le futur réchauffement de la planète, s'il poursuit son ascension, ne sera uniforme ni dans le temps ni dans l'espace.**

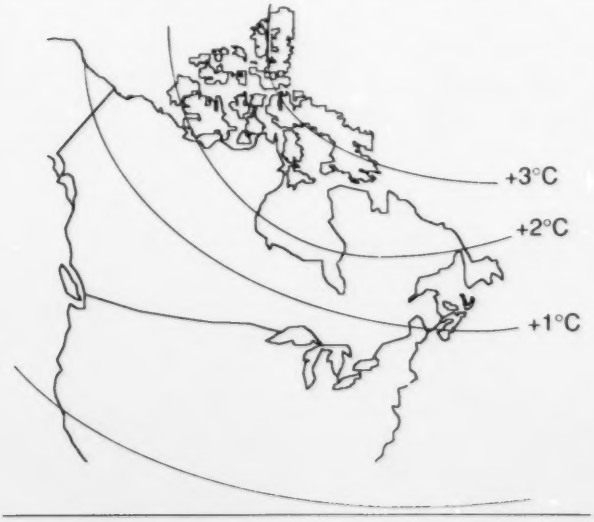
*Le dernier siècle.* Grâce à un volumineux corpus de documents scientifiques sur le sujet, les changements climatiques du dernier siècle peuvent être étudiés avec beaucoup plus de précision que ceux portant sur les périodes antérieures. Ces documents permettent d'analyser les configurations tant spatiales que temporelles des changements de façon beaucoup plus détaillée et avec une plus faible marge d'erreur.

Les études de ces archives montrent que, même dans le délai relativement court d'un siècle, le climat canadien a connu des variations notables (fig. 12). Les températures moyennes y présentent sensiblement la même configuration générale que les températures globales — un réchauffement jusqu'au début des années 1940, puis un refroidissement modéré jusque vers 1975 suivi d'un nouveau réchauffement plus prononcé persistant jusque dans les années 1980. Néanmoins, les variations ont été plus marquées au Canada.

Considérant les configurations climatiques régionales au Canada (fig. 13), la tendance au refroidissement du milieu du siècle semble avoir été beaucoup plus prononcée dans l'ouest du pays et débute presque une décennie plus tôt que dans l'est. De plus, bien que les tendances des 30 dernières années indiquent un réchauffement marqué en hiver et au printemps, notamment dans l'ouest, les étés ne présentent guère de changement, et le refroidissement dans l'est du pays est le plus significatif en automne (voir «Le changement climatique au Canada»).

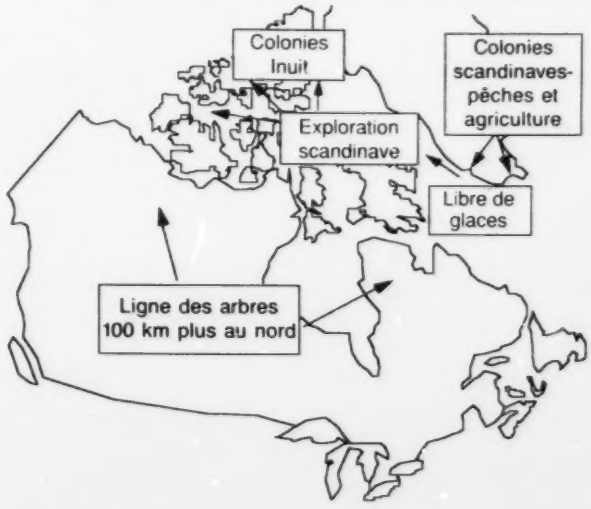
Toutes ces tendances doivent nous rappeler que le réchauffement accru des dernières années n'est pas sans précédent dans l'histoire du climat mondial. Ce que nous avons connu jusqu'ici reste dans les limites des variations

**Figure 10**
**Estimation de l'augmentation des températures en Amérique du Nord durant le sommet chaud de l'Holocène, il y a 6 000 ans**



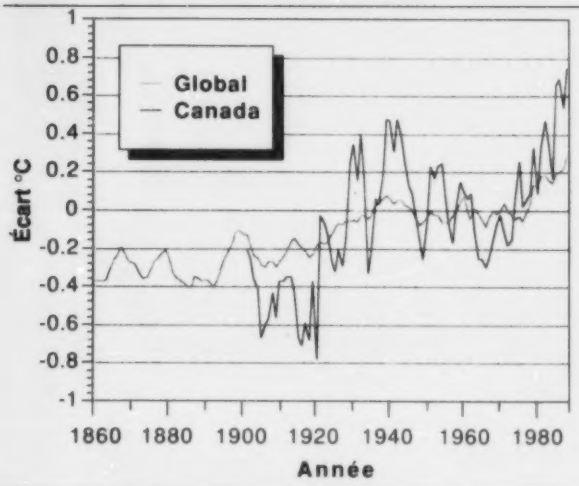

SOURCE : Folland *et al.*, 1990.

**Figure 11**
**Conditions dans l'Arctique pendant l'épisode médiéval chaud, il y a 1 000 ans**




SOURCE : SEA, Environnement Canada.

**Figure 12**
**Tendances globales et canadiennes des températures de surface depuis 1860**

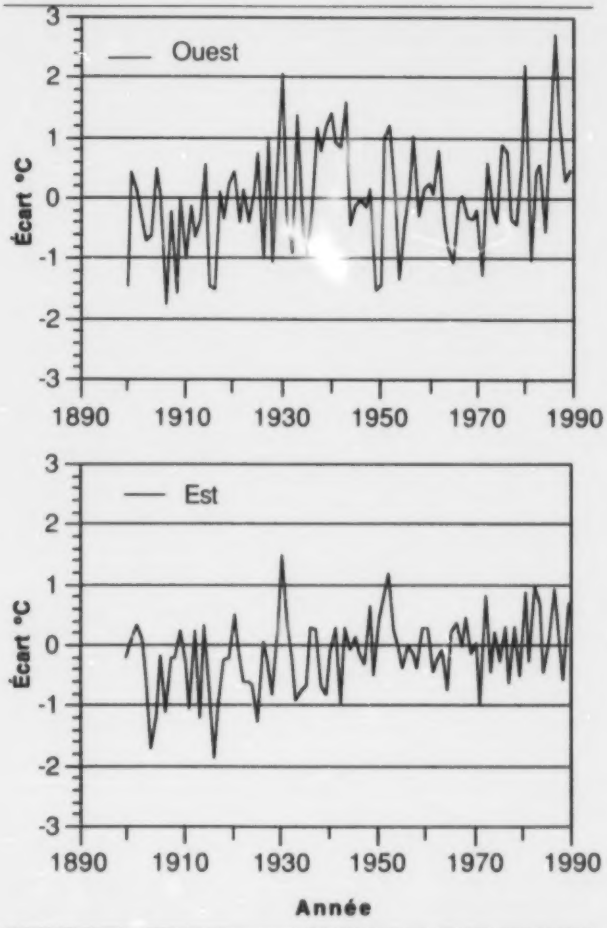



SOURCE : SEA, Environnement Canada.

Le graphique montre l'écart entre la température moyenne annuelle et la moyenne de 1950-1979 (représentée par la ligne 0).

climatiques naturelles de l'ère préindustrielle. Toutefois, si la tendance des dernières années devait se poursuivre, ces limites seraient rapidement dépassées, et nous pourrions entrer dans une période de changements climatiques bien différente de tout ce qu'a connu le dernier million d'années.

**Figure 13**
**Tendances des températures dans le sud du Canada**




SOURCE : SEA, Environnement Canada.

Variations de la température annuelle moyenne dans la moitié méridionale de l'ouest et de l'est du Canada. On montre l'écart de la température par rapport à la moyenne de 1950-1979.

*Chapitre 2*

# Le renforcement de l'effet de serre

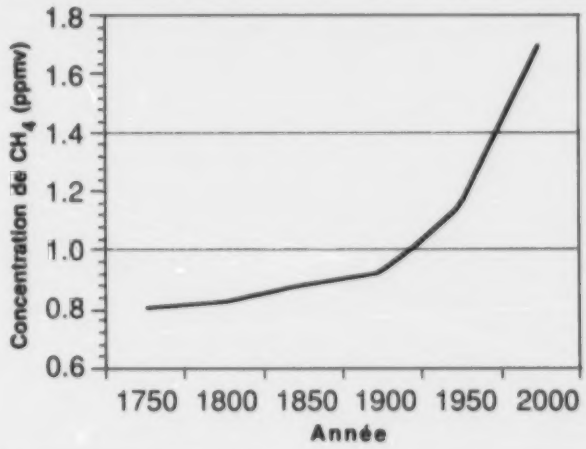
L'analyse des carottes de glace extraites des calottes polaires apporte quelques indications importantes sur la relation qui a existé entre l'effet de serre naturel et le climat terrestre. Les carottes antarctiques — dont la plus profonde a pénétré à plus de 2 km sous la surface de la glace polaire australe — se sont révélées particulièrement instructives. Grâce à elles, des scientifiques ont pu reconstituer les températures de même que les concentrations de dioxyde de carbone qu'a connues l'Antarctique au cours des 160 000 dernières années.

Quand on les compare, ces deux séries de données présentent une corrélation remarquable, notamment pour la transition entre les périodes glaciaires de refroidissement et les interglaciaires de réchauffement (fig.7). Les processus responsables de cette relation ne sont pas encore bien compris. Toutefois, on semble avoir des preuves que les concentrations des gaz à effet de serre ont varié significativement dans le passé et que ces variations ont pu jouer un rôle important dans les changements considérables qui ont touché les températures globales.

Les carottes de glace confirment que les concentrations des gaz à effet de serre sont variables, mais elles montrent aussi que ces variations peuvent avoir des limites naturelles. Pendant les 160 000 dernières années, les concentrations de dioxyde de carbone ne sont jamais descendues en dessous d'environ 190 parties par million en volume (ppmv), ni, jusqu'à tout récemment, n'avaient-elles été supérieures à 290 ppmv (fig. 7). De même, les concentrations de méthane semblent être restées dans une marge assez étroite de 0,3 à 0,7 ppmv durant la même période.

Toutefois, les récentes mesures des concentrations de gaz à effet de serre des derniers siècles, encore obtenues par les carottes de glace, révèlent que la tendance est en train de s'écarter de façon importante des anciens modèles. Comme on peut le voir à la figure 7, la concentration actuelle de dioxyde de carbone est supérieure à 350 ppmv, dépassant de plus de 20 % les valeurs les plus élevées des 160 000 dernières années. La concentration de méthane semble avoir plus que doublé par rapport aux valeurs de l'ère préindustrielle (fig. 14), tandis que la concentration d'oxyde nitreux a connu une augmentation beaucoup plus modérée, d'à peu près 5 à 10 %. Si ces gaz sont véritablement les principaux acteurs dans l'effet de serre naturel, la croissance de leurs concentrations laisse présager une accentuation possible de cet effet bien au-delà de tout ce que la planète peut avoir connu au moins pendant le dernier million d'années.

**Figure 14**
**Variations des concentrations de méthane atmosphérique durant les 200 dernières années**




SOURCE : Houghton *et al.*, 1990.

Au cours des dernières décennies, la recherche a consacré des efforts intenses à l'obtention d'une mesure plus exacte des concentrations de ces gaz. Les scientifiques ont essayé en même temps de mieux comprendre les processus qui entraient en jeu lors de leur émission et de leur retrait de l'atmosphère, et d'être mieux à même d'estimer leurs concentrations à venir.

## Le dioxyde de carbone ($CO_2$)

Comprendre comment la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique se modifie n'est pas une tâche facile. Ce gaz est constamment retiré de l'air par le transfert du carbone aux substances biotiques par photosynthèse et par absorption directe dans l'eau. À son tour, ce carbone est réévacué dans l'air par la respiration des plantes et des animaux, la putréfaction de la biomasse morte, le dégazage des surfaces d'eau et la combustion (fig. 15). Le dioxyde de carbone est aussi injecté directement dans l'atmosphère par les éruptions volcaniques.

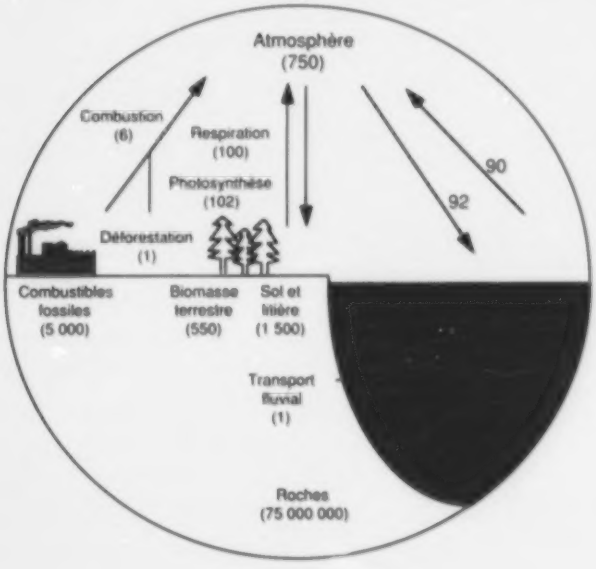
Les zones de stockage de carbone les plus actives de l'écosystème terrestre sont la biosphère terrestre, l'atmosphère et les océans. Ces trois réservoirs contiennent environ 550, 750 et 39 000 milliards de tonnes (Gt) de carbone respectivement. L'atmosphère échange chaque année environ 90 Gt de carbone avec l'océan et de 60 à 120 Gt avec les plantes vivantes. En une dizaine d'années, le montant net de carbone prélevé dans l'atmosphère par les processus naturels est à peu près égal à la quantité libérée.

Les sols, les roches et les combustibles à base de carbone constituent aussi de vastes réservoirs de cet élément. Les estimations indiquent que les sols peuvent en contenir jusqu'à 1 500 Gt. Les combustibles carbonés en contiennent approximativement 5 000 Gt, tandis que les roches en emmagasinent encore bien davantage (une estimation de 75 millions Gt). Toutefois, ces réservoirs, à moins d'être perturbés par des causes non naturelles, n'échangent le carbone avec l'atmosphère que très lentement et sur de très longues périodes.

De nos jours, l'activité humaine semble influer significativement sur l'équilibre naturel à l'intérieur du cycle global du carbone. La transformation à grande échelle des terres forestières en terres agricoles aurait, pendant le dernier siècle, libéré plus de 100 Gt de carbone dans l'air. Le taux annuel des nouveaux rejets de carbone attribuables à la déforestation peut même être plus rapide maintenant, surtout à cause des opérations à grande échelle de brûlage des rémanents dans les forêts tropicales de l'Amérique du Sud, de l'Afrique et de l'Asie du Sud-Est. Malgré la croissance de nouvelles forêts dans l'hémisphère Nord qui peut compenser partiellement ces rejets, la nouvelle contribution biosphérique de carbone dans l'atmosphère est évaluée entre 0,6 et 2,5 Gt environ par an.

Néanmoins, beaucoup plus importante est l'extraction toujours accrue des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) de la croûte terrestre pour répondre aux demandes énergétiques d'une société mondiale en industrialisation constante. Pendant la combustion, le carbone contenu dans les combustibles fossiles s'oxyde et est libéré sous forme de dioxyde de carbone. Chaque tonne de carbone brûlé dégage 3,7 tonnes de dioxyde de carbone. La production de ciment apporte elle aussi une contribution, quoique modeste (à peu près 2 %), à ces émissions. On estime que ces sources ajoutent chaque année à l'atmosphère 6 Gt de carbone, ou 22 Gt de dioxyde de carbone, soit plus de dix fois le taux du début du siècle (fig.16).

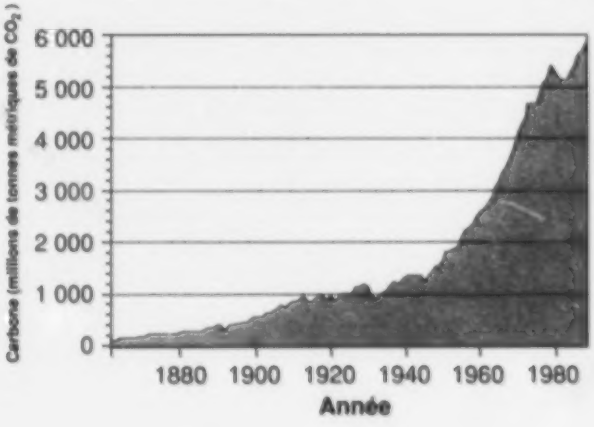
**Figure 15**
**Cycle du carbone global**




SOURCE : Watson *et al.*, 1990.

**Le diagramme montre le cycle global du carbone et ses zones de stockage en milliards de tonnes de carbone.**

**Figure 16**
**Contenu en carbone des émissions annuelles globales de dioxyde de carbone provenant des combustibles fossiles et de la production de ciment, 1860 à 1988**




SOURCE : Boden *et al.*, 1990.

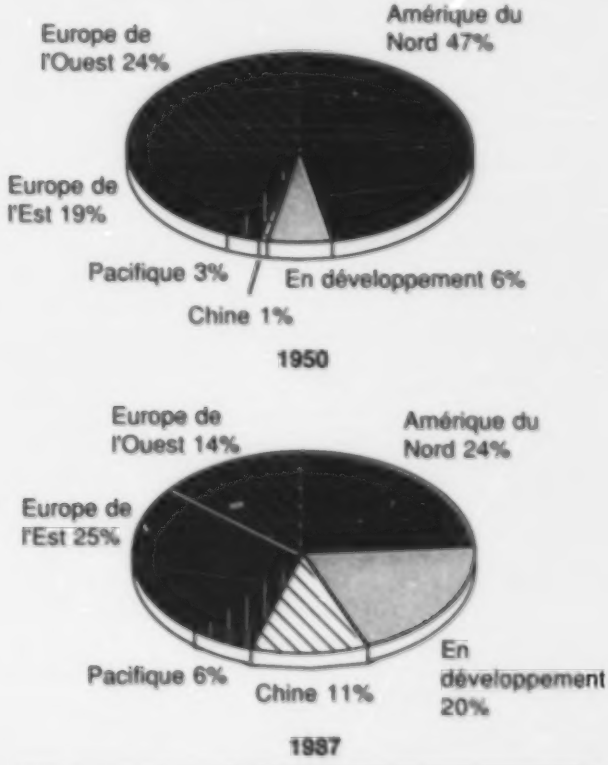
Comme on peut s'en douter, les émissions de dioxyde de carbone dues à l'utilisation de combustibles fossiles sont très inégalement réparties dans le monde, la plus large part revenant aux pays développés de l'hémisphère Nord. Toutefois, les émissions augmentent à un rythme accéléré dans plusieurs pays en développement (fig. 17), notamment en Chine et en Inde. Si ces tendances persistent, il est probable que les émissions de dioxyde de carbone sur la planète seront beaucoup plus élevées dans l'avenir.

Les émissions anthropiques (découlant de l'activité humaine) de dioxyde de carbone semblent encore assez faibles comparativement aux quantités absolument énormes qui pénètrent dans l'air et en ressortent par des processus naturels. En fait, l'activité humaine produit annuellement à peu près 4 % du dioxyde de carbone d'origine naturelle. Néanmoins, c'est là un ajout net à un aspect du cycle global du carbone qui est déjà en équilibre relatif. De plus, cet apport est cumulatif dans le temps.

Au cours des trente dernières années, on a soigneusement mesuré en plusieurs endroits de la planète les concentrations de dioxyde de carbone, et les résultats de ces additions ne prêtent à aucune équivoque. Les tendances (fig. 18) montrent des taux actuels d'augmentation d'environ 1,8 ppmv, ou 0,5 %, par an et une hausse nette de 11 % en 30 ans. Ce taux de progression est en fait significativement inférieur à ce qu'il pourrait être si toutes les émissions anthropiques de dioxyde de carbone devaient rester dans l'atmosphère. Cependant, près de 50 % de ces émissions de carbone semblent se réinsérer dans le cycle du carbone naturel. Bien que le puits net de ce processus d'élimination du carbone soit encore mal compris, on croit que les océans en sont le principal réceptacle. En somme, le système naturel semble en mesure d'absorber une partie de l'intervention humaine, mais une partie seulement.

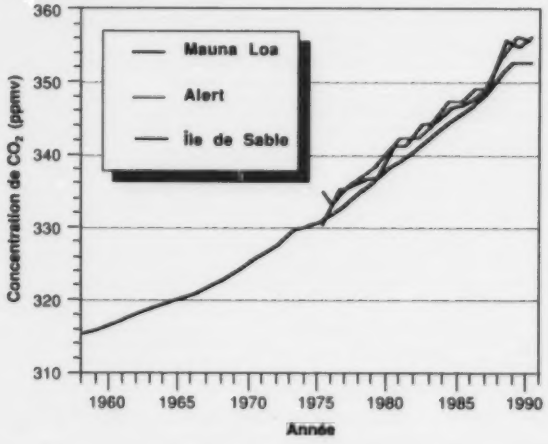
Il est très difficile de prévoir ce que seront les concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. C'est autour des futurs taux d'émission de dioxyde de carbone provenant de l'activité humaine que règne la plus grande incertitude. Ces taux dépendent de plusieurs variables. Par exemple, quel sera le rythme de la croissance démographique mondiale? Aurons-nous recours à l'avenir aux sources d'énergie actuelles? Notre consommation énergé-

**Figure 17**
**Distribution régionale des émissions de dioxyde de carbone provenant des combustibles fossiles, 1950 et 1987**




SOURCE : World Resources Institute (É.-U.), 1990.

**Figure 18**
**Concentrations de dioxyde de carbone atmosphérique**




SOURCE : Boden *et al.*, 1990; SEA, Environnement Canada.

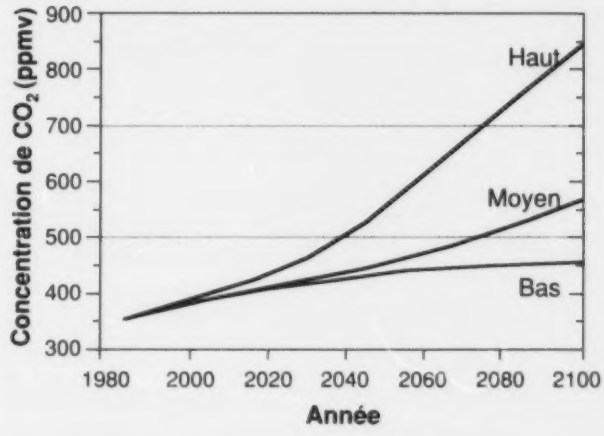
Le diagramme montre les concentrations de dioxyde de carbone mesurées à l'île d'Hawaï et au Canada.

tique sera-t-elle plus efficace? Et jusqu'où les pays en développpement amélioreront-ils leur niveau de vie et par conséquent augmenteront-ils leur consommation d'énergie? D'autre part, la réponse à ces questions dépendra de décisions humaines, d'actions politiques ainsi que de progrès technologiques et socio-économiques eux-mêmes largement imprévisibles. On estime que d'ici 2050 les émissions annuelles de dioxyde de carbone de sources humaines pourraient osciller entre au minimum 40 % des niveaux actuels (dans l'hypothèse d'une efficacité énergétique optimale et de l'utilisation de combustibles non fossiles) et au maximum 400 % (dans l'hypothèse où il y aurait une forte consommation de charbon et pas d'amélioration dans l'efficacité énergétique).

Il y a aussi, à un degré moindre mais malgré tout important, des incertitudes sur la quantité de dioxyde de carbone retenue dans l'atmosphère. Le système naturel continuera-t-il d'en éliminer 50 % ou même davantage par l'absorption dans la biosphère terrestre ou les océans? Ou la fraction restant dans l'atmosphère augmentera-t-elle avec le temps? Jusqu'ici la réponse demeure incertaine et nous devons attendre les résultats de recherches et d'observations intensives plus poussées portant sur le cycle naturel du carbone.

Face à ces incertitudes, nos meilleures estimations des futures concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone donnent lieu à divers scénarios. Le plus sombre prévoit le doublement possible, dès le milieu du siècle prochain, des concentrations de l'ère préindustrielle. Un autre, un peu moins pessimiste, entrevoit un doublement probable d'ici la fin du siècle prochain. Toutefois, un scénario optimiste imagine une stabilisation des concentrations avant que le niveau n'ait doublé (fig. 19).

**Figure 19**
**Projections des concentrations futures de dioxyde de carbone atmosphérique**




SOURCE : Houghton *et al.*, 1990.

Le scénario haut implique une continuation des tendances actuelles; le bas scénario tient compte d'actions positives pour réduire les émissions anthropiques de dioxyde de carbone.

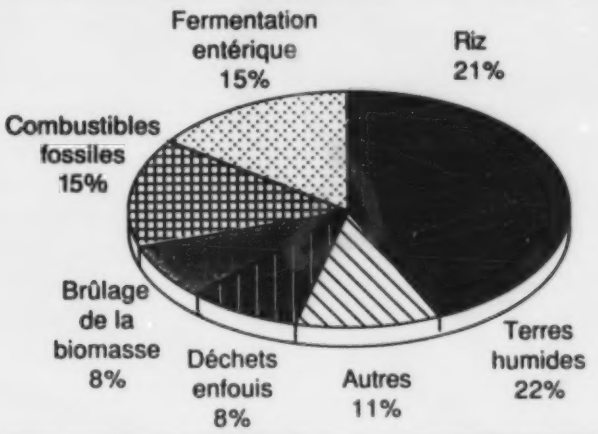
## Le méthane ($CH_4$)

Le méthane est le produit naturel de la décomposition de la matière organique en l'absence d'oxygène. Bien que les concentrations de méthane n'aient pas fait l'objet de mesures continues depuis aussi longtemps que celles du dioxyde de carbone, les études de la dernière décennie laissent croire qu'elles augmentent au rythme d'à peu près 1 % par an et qu'elles sont déjà supérieures de 100 % aux valeurs préindustrielles mesurées dans les carottes de glace (fig. 14).

Tout comme le dioxyde de carbone, le méthane possède un cycle naturel entre la surface de la Terre et l'atmosphère. Les terres humides en sont la principale source — d'où son nom populaire de «gaz des marais». Il est aussi libéré par le processus digestif d'insectes comme les termites, et de ruminants comme les moutons et les bovins. Même si la superficie globale des terres humides naturelles est en fait en voie de diminution à cause de l'intervention humaine, celle des rizières semble s'accroître rapidement, tandis que la population globale de bétail domestique a quadruplé pendant le dernier siècle. Les autres sources comprennent les processus industriels, l'extraction des combustibles fossiles et les déchets enfouis (fig. 20).

La progression des émissions de méthane résulte avant tout des changements dans l'utilisation des terres dus à la croissance rapide et constante de la population mondiale. Comme il y a peu de chance que celle-ci se stabilise d'ici au moins un siècle, on peut s'attendre à ce que ces changements se poursuivent et qu'il y ait de nouvelles hausses des émissions de méthane. En même temps, le taux d'élimination du méthane de l'atmosphère par des processus naturels pourrait se ralentir. La réaction avec le radical hydroxyle (OH) constitue le principal piège atmosphérique du méthane, mais les concentrations de OH sont en baisse à la suite des réactions avec d'autres polluants chimiques présents dans les zones urbaines. La combinaison de ces tendances indique que la contribution du méthane au renforcement de l'effet de serre continuera de s'accentuer au cours du prochain siècle.

**Figure 20**
**Estimation de la contribution de diverses sources aux émissions globales totales de méthane**




SOURCE : Watson *et al.*, 1990.

## Les autres gaz à effet de serre

Les concentrations d'*oxyde nitreux* ($N_2O$) progressent maintenant de 0,3 % par année, et les valeurs actuelles sont d'environ 5 à 10 % supérieures à celles de l'époque préindustrielle. Le cycle naturel de l'oxyde nitreux demeure mal compris; on estime que l'augmentation des émissions est surtout due aux engrais à base d'ammoniac (tant sous forme de produits chimiques que de déchets naturels évacués par les animaux domestiques) et à l'utilisation de combustibles fossiles pour la production d'énergie.

L'*ozone* ($O_3$) se trouve à l'état naturel en concentrations infimes dans la basse atmosphère. Une partie provient de la haute atmosphère, où elle est produite à partir de l'oxygène par photodissociation, tandis que le reste est produit près de la surface terrestre par des processus chimiques auxquels participent les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et d'autres polluants atmosphériques. Bien que l'ozone superficiel (ou troposphérique) se décompose très vite, ses concentrations semblent s'accroître rapidement dans les villes à cause des augmentations d'oxydes d'azote et d'autres polluants associés en grande partie aux transports et à la combustion. On estime généralement que l'augmentation des concentrations globales d'ozone à la surface dans l'hémisphère Nord pourrait atteindre 1 % par année. Toutefois, il est possible que les effets de cette progression soient atténués par les changements dans la concentration et la distribution de l'ozone dans l'atmosphère moyenne et supérieure. Par conséquent, l'incidence nette de la modification des concentrations d'ozone sur l'effet de serre reste mal définie.

Les *hydrocarbures halogénés* contiennent du chlore et du brome et sont, à nombre égal de molécules, parmi les gaz à effet de serre les plus puissants de l'atmosphère (voir encadré p. 30). Ils n'existent pas à l'état naturel mais sont produits industriellement en grandes quantités. Les membres les plus connus de ce groupe de produits chimiques sont les chlorofluorocarbures (CFC), largement utilisés dans les solvants, les fluides frigorigènes, les propulseurs d'aérosol et les agents gonflants pour mousse. Les halons, dérivés bromés, utilisés comme produits extincteurs sont également importants.

Parce que ces hydrocarbures halogénés et de nombreux autres sont très stables et ne réagissent pas rapidement avec d'autres gaz, chaque molécule libérée dans l'atmosphère peut y demeurer des dizaines et même des centaines d'années, tant qu'elle n'a pas atteint la haute atmosphère où elle est finalement dissociée par le rayonnement ultraviolet intense. Cette dissociation libère du chlore qui détruit les molécules d'ozone à haute altitude (chap. 6). Bien que les concentrations atmosphériques des principaux CFC soient encore assez faibles, elles augmentent au rythme de 4 % par an et on les soupçonne déjà d'être des facteurs importants de l'augmentation de l'effet de serre.

Même si la *vapeur d'eau* en est en réalité l'agent le plus puissant, elle n'est pas en soi un facteur essentiel de l'augmentation de l'effet de serre. Néanmoins, elle sera un facteur de rétroaction tant positive que négative à mesure que les températures s'élèveront. Étant donné que l'air chaud peut contenir plus d'humidité et que les températures plus élevées feront évaporer davantage d'eau de la surface terrestre, la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère augmentera. Ce phénomène accentuera l'effet de serre, mais l'humidité supplémentaire de l'atmosphère contribuera aussi à la formation des nuages. Cela aura pour effet de réduire la quantité d'énergie solaire qui réchauffera la surface terrestre, atténuant ainsi partiellement l'augmentation du réchauffement par effet de serre que cause la vapeur d'eau.

## Les autres influences humaines

Nul doute que l'augmentation de l'effet de serre naturel sera la principale conséquence de l'action humaine sur le climat global. Toutefois, ces activités peuvent aussi influer considérablement de diverses manières sur le climat local et régional. Les effets de certaines de ces activités pourraient en définitive devenir plus importants à l'échelle mondiale.

*Évolution dans l'utilisation des terres.* À mesure que l'être humain remplace la forêt par des terres agricoles, ou la

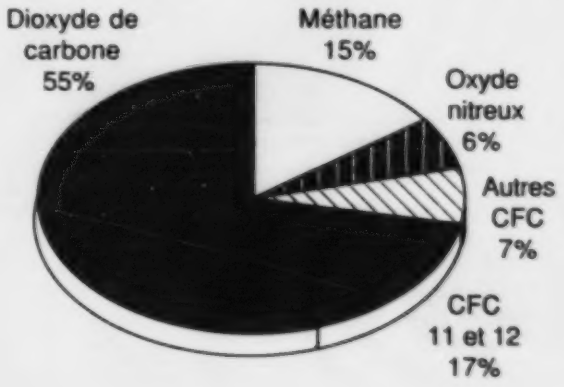
## Les gaz à effet de serre : une comparaison

À nombre égal de molécules, le dioxyde de carbone est le moins efficace des principaux gaz à effet de serre. Par comparaison, le méthane absorbe et réfléchit environ 21 fois plus d'énergie thermique, et l'oxyde nitreux est à peu près 206 fois plus actif. Les CFC sont encore plus puissants, chaque molécule absorbant 15 000 fois plus de chaleur qu'une molécule de dioxyde de carbone.

Cependant, la contribution globale de chaque gaz à effet de serre dépend aussi de deux autres facteurs. L'un d'eux est son temps de séjour dans l'atmosphère – c'est-à-dire la période pendant laquelle il y subsiste avant d'être détruit par des réactions chimiques, ou absorbé par la biosphère ou les océans. Par exemple, l'effet du méthane, par rapport à celui d'autres gaz à effet de serre, est diminué jusqu'à un certain point parce que le séjour de ce gaz dans l'atmosphère est relativement bref. Les émissions accrues de méthane tendent à s'accumuler lentement, tout comme l'argent d'un compte bancaire dans lequel les dépôts ne sont que légèrement supérieurs aux retraits.

Toutefois, avec des gaz comme l'oxyde nitreux et les CFC dont le temps de séjour est plus long, le taux de retrait est significativement plus faible et les nouvelles émissions ont un effet cumulatif plus marqué. Bien qu'il soit difficile d'établir des comparaisons exactes, il est probable qu'à long terme chaque tonne de CFC rejetée dans l'atmosphère aura des milliers de fois plus d'effet de réchauffement que la même quantité de dioxyde de carbone. On peut prévoir que l'effet d'un même nombre d'unités d'oxyde nitreux sera plusieurs centaines de fois supérieur, alors que celui du méthane le sera probablement de 15 à 25 fois.

L'autre grand facteur, dans ces comparaisons, est la quantité de chaque gaz ajoutée à l'atmosphère. Étant donné que nous y rejetons, et de loin, beaucoup plus de dioxyde de carbone que de tout autre gaz à effet de serre, ce gaz est à lui seul celui qui contribue le plus à l'augmentation de l'effet de serre. On estime que le dioxyde de carbone représente près de 56 % de l'accroissement qu'a connu ces dix dernières années le potentiel de réchauffement de la planète. Les CFC qui dans leur ensemble contribuent dans une proportion d'à peu près 24 % à l'actuel réchauffement par effet de serre occupent la deuxième place, suivis par le méthane et l'oxyde nitreux.




végétation naturelle par de l'asphalte et du béton, il modifie en grande partie la façon dont la surface terrestre réfléchit la lumière solaire et libère de la chaleur. En général, le sol nu labouré absorbe davantage de lumière solaire que le couvert forestier, et les terrains de stationnement asphaltés davantage que les prairies. D'autre part, les déserts créés par la déforestation et le surpâturage réfléchissent davantage de lumière solaire que les arbres et les prairies qu'ils supplantent. Tous ces changements peuvent aussi modifier les configurations régionales de l'évaporation, du ruissellement et des pluies. Bien qu'ils puissent avoir une influence locale importante, ces changements n'auront probablement pas dans la majorité des cas d'effet notable sur le climat global.

*Poussière atmosphérique*. Du fait de ses activités tant agricoles qu'industrielles, l'humanité ajoute à l'atmosphère de grandes quantités de fines particules (aérosols). Presque tous ces aérosols sont rapidement entraînés par la gravité et les pluies, mais ils n'en influent pas moins sur le bilan radiatif de l'atmosphère. C'est la quantité et la nature des particules tout comme la nature de la surface terrestre ou marine située en dessous qui déterminent si cet effet ira ou non dans le sens de la tendance au réchauffement. Les effets régionaux peuvent néanmoins être importants. Ainsi, certains scientifiques ont avancé récemment que les fortes concentrations d'aérosols soufrés dans l'hémisphère Nord peuvent être la cause d'une plus grande couverture nuageuse à bas niveau (les aérosols augmentant les vitesses de condensation dans les nuages), réduisant ainsi le réchauffement solaire. Ils ajoutent que cela a pu réduire temporairement l'ampleur du réchauffement hémisphérique qui pourrait se produire en raison du renforcement de l'effet de serre. Cependant, les effets globaux nets des changements dans les aérosols ne sont pas encore bien compris.

*Brume arctique*. Depuis les années 40, les observateurs de l'Arctique ont signalé la présence croissante de couches de brume d'un brun rougeâtre. Cette brume, que l'on observe

surtout en hiver et au printemps lorsque l'air arctique est très calme, se compose d'aérosols industriels, provenant principalement de l'Europe et du nord de l'Asie, que les vents dominants transportent sur de longues distances jusque dans l'Arctique. Ces aérosols contiennent des particules de suie et des particules acides qui accentuent l'absorption et la diffusion nettes de la lumière solaire du printemps dans la basse atmosphère. Ils accroissent aussi l'absorption par la surface de la lumière solaire à mesure qu'ils se déposent sur la neige et la glace. La brume peut causer un léger réchauffement des températures printanières arctiques, auquel cas il pourrait aussi y avoir des changements dans la configuration des vents de l'hémisphère.

*Îlots thermiques urbains.* Le milieu urbain est très différent du milieu rural dont il prend la place. Les bâtiments et les véhicules rejettent directement la chaleur dans l'air tandis que la pollution atmosphérique et les surfaces sombres des pavés et des toits accentuent l'absorption de la lumière solaire. Les constructions peuvent aussi modifier le flux de vent : la vitesse augmente entre les grands immeubles mais peut aussi tomber à zéro du côté abrité. Il en résulte que les villes sont nettement plus chaudes que la campagne environnante, surtout l'hiver. Ainsi, la température au centre de Toronto est en moyenne supérieure d'environ 3 °C à celle de ses banlieues. Toutefois, l'effet est strictement local. Même si tous les îlots thermiques urbains du monde étaient réunis, leur influence sur les conditions climatiques du globe ne serait pas significative.

*Détournements et stockage de l'eau.* Quelle que soit sa forme (cours d'eau ou lacs), l'eau est pour l'air au-dessus une source d'humidité et un important moyen d'accumuler la chaleur. Les plans d'eau ont pour effet de rafraîchir le climat local en été et de le réchauffer en hiver. Les projets à grande échelle visant à retenir ou à détourner les eaux peuvent par conséquent exercer une influence significative sur les climats régionaux.

*Chapitre 3*

# La prévision du changement climatique

Tout grand changement climatique entraîne inéluctablement un risque de transformation radicale de l'écosystème global. Les sociétés humaines seraient alors confrontées à des bouleversements physiques, sociaux et économiques qui dépasseraient tout ce que le monde a connu jusqu'à ce jour; chacune d'elles devrait en ce cas absolument y faire face. C'est pourquoi il est d'une importance cruciale de savoir quels changements seraient à craindre et quelles en seraient les conséquences. Cependant, étant donné la complexité du système climatique de la Terre, peut-on vraiment prévoir ces changements avec un degré acceptable de certitude?

Le système climatique global met en jeu des processus et des interactions qui sont malheureusement trop complexes et d'une trop grande portée pour qu'on les reproduise en laboratoire. De plus, l'étude des systèmes climatiques d'autres planètes, comme Mars et Vénus, n'est pas d'une grande utilité, puisqu'on n'y trouve ni océans ni biosphère terrestre.

En étudiant le comportement passé du climat de la Terre, on peut recueillir beaucoup d'informations sur son évolution et entrevoir les causes possibles de changement, mais cela ne nous éclaire pas sur les processus physiques impliqués. À partir des tendances des climats connus, on ne peut pas non plus extrapoler le futur, surtout quand on considère que les forces intervenant dans les changements à venir peuvent être extrêmement différentes de celles du passé.

Heureusement, par contre, la plupart des processus, interactions et changements particuliers qui font partie du système climatique peuvent s'exprimer en termes de relations statistiques et de lois physiques bien définies, comme la loi de la conservation de la masse et de l'énergie et les lois du mouvement de Newton. Ces relations physiques peuvent se traduire en expressions mathématiques et, à l'aide d'ordinateurs de haut niveau, servir à calculer la réaction du climat aux forces de changement.

À l'heure actuelle, on fait énormément appel à ces modèles mathématiques pour étudier les effets qu'ont sur le climat des phénomènes actuels, comme les éruptions volcaniques et les anomalies de température de l'océan. Ils permettent aussi de parfaire nos connaissances des phénomènes climatiques passés et de simuler les réactions possibles du système climatique à de grands bouleversements, comme une guerre nucléaire ou l'accentuation de l'effet de serre.

## Les modèles mathématiques du climat

Les techniques mathématiques et les capacités informatiques étant limitées, il est impossible de reproduire en détail tous les processus participant au système climatique. Les modélisateurs doivent donc leur appliquer des simplifications et des approximations, estimer lesquels ont le plus d'importance et lesquels sont le moins touchés par ces modifications. On peut élaborer bien des sortes de modèles. La nature de chacun dépend de l'application à laquelle on le destine, des simplifications nécessaires et de la précision spatiale et temporelle désirée.

Un modèle climatique extrêmement simple est celui qui réduit la température de la Terre à une moyenne globale en un seul point. Il peut servir à calculer la température moyenne de la surface de la Terre comme équilibre énergétique découlant des propriétés de l'atmosphère de la planète en termes de réflectivité et d'effet de serre.

À l'extrême inverse, on trouve les modèles de circulation générale (MCG), très complexes et très évolués, qui font intervenir les lois physiques de conservation de la quantité de mouvement, de la masse, de l'humidité et de l'énergie et donnent une représentation tridimensionnelle très détaillée des océans et de l'atmosphère. Ils peuvent simuler la manière dont les différents paramètres du climat (température, humidité, direction et vitesse du vent, teneur du sol en humidité, et nombres d'autres encore) évolueront dans le temps en n'importe quel point du globe à mesure que diverses conditions sont modifiées.

Entre les deux, se situe une vaste gamme de modèles à une ou deux dimensions, qu'on utilise pour étudier, avec divers degrés de complexité, les différents processus et interactions mis en cause dans le climat. Ils permettent d'étudier très efficacement un bon nombre de relations climatiques à petite échelle, et les informations qu'on en retire sont utiles pour l'amélioration des équations utilisées dans les MCG.

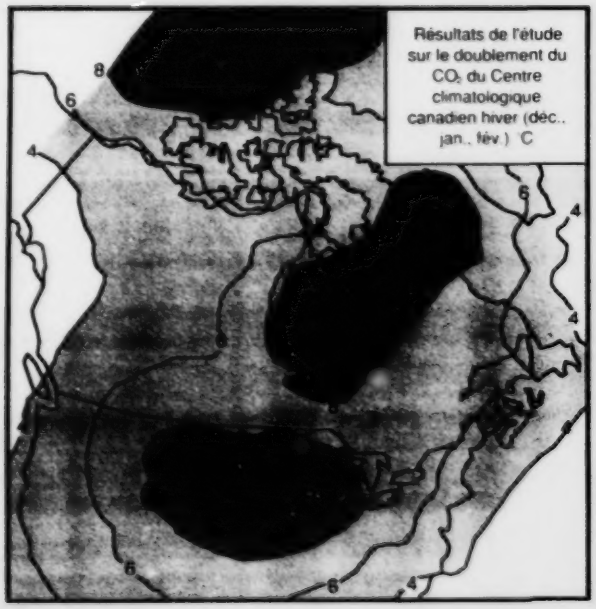
Cependant, même le modèle de circulation générale le plus complexe n'est en réalité qu'une description très sommaire du système climatique réel. Bien que le modèle effectue des calculs pour des dizaines de milliers de points de l'atmosphère et des océans, et qu'il résolve pour cela 200 000 équations ou plus, ces simulations ne décrivent pas totalement les caractéristiques et processus climatiques dans l'espace et dans le temps.

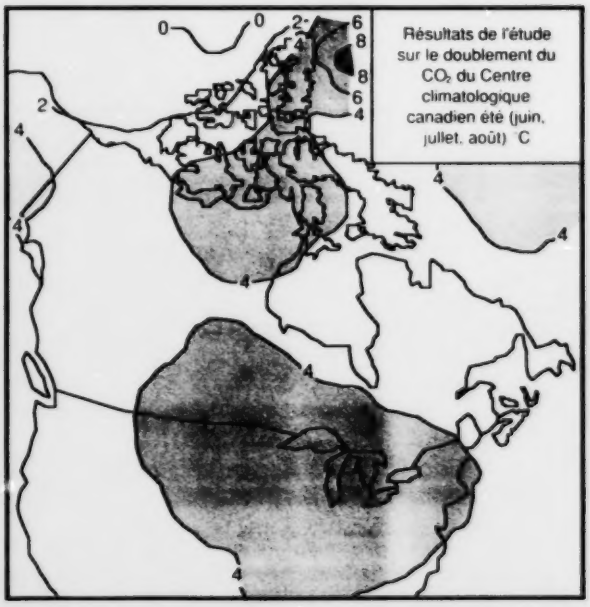
## Le MCG canadien

Un des MCG les plus perfectionnés à l'essai de nos jours a été élaboré par un groupe de chercheurs du Centre climatologique canadien à Toronto. Il comporte certaines améliorations par rapport aux MCG utilisés par d'autres groupes pour des expériences antérieures sur la modélisation du climat. En particulier, sa résolution spatiale est plus élevée (donc, une grille plus fine) que celle des précédents MCG, ce qui donne une couverture d'information deux fois plus grande et permet de représenter avec beaucoup plus de détail les processus climatiques locaux. De même, il simule beaucoup mieux les propriétés de réflection et d'absorption des nuages, le réchauffement solaire annuel et quotidien, la température des océans et les limites des glaces. Par contre, pas plus que les autres modèles, il ne dispose d'un océan en circulation parfaitement interactif. On continue de travailler à lui apporter de nouvelles améliorations, dont un océan dynamique à deux dimensions.

La première grande expérience faite avec ce modèle, une étude des effets qu'aurait sur le climat un doublement du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, s'est terminée à la fin de 1989. Malgré les améliorations apportées à la conception du modèle, les résultats de cette expérience restent assez similaires à ceux des entreprises antérieures de simulation du réchauffement global. Par exemple, le groupe canadien a obtenu une projection d'un réchauffement global net en surface de 3,5 °C, à peu près au milieu de la gamme trouvée par les autres modélisateurs. De même, bien que sa prévision d'une augmentation de 3,8 % de la moyenne de l'évaporation et des précipitations à l'échelle de la planète soit nettement inférieure à celles des autres groupes (de 7,1 à 15,8 %), elle n'en indique pas moins la même tendance.

Pour ce qui est du Canada, le MCG canadien montre un réchauffement de 4,8 °C dans le sud, avec peu de variation d'une saison à l'autre. Dans le nord, le réchauffement atteint 8 à 12 °C en hiver, mais reste entre 0 et 6 °C en été. L'évaporation augmentant plus que les précipitations, la disponibilité de l'humidité du sol diminue en toute saison dans la plus grande partie du pays, la baisse étant plus marquée (plus de 20 %) dans la région du centre-sud. On constate une nette augmentation de l'approvisionnement en eau au Yukon en été, et dans la quasi-totalité de l'Arctique ainsi que le long de la côte ouest en hiver.



Un MCG typique divise la surface de la Terre en une grille, ou série de boîtes. Les premiers modèles, à basse résolution, prenaient des boîtes assez grosses, qui couvraient chacune une superficie de 640 000 km$^2$, soit environ celle du Manitoba. Les modèles modernes de la plus haute résolution ont des boîtes d'environ 90 000 km$^2$, soit à peu près 20 % de plus que la surface du Nouveau-Brunswick. Dans le plan vertical, l'atmosphère peut être représentée par deux à quinze couches, selon la résolution du modèle.

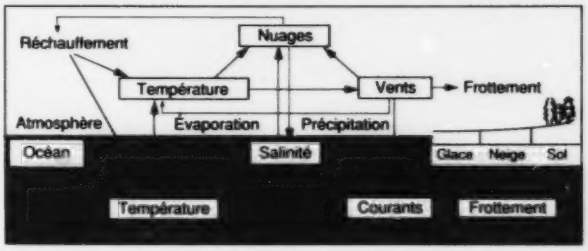
Néanmoins, un grand nombre d'importants processus climatiques se déroulent à des échelles beaucoup plus petites que même la plus petite de ces mailles de grille; il faut donc les traiter en bloc plutôt qu'individuellement. On en fixe les valeurs par le procédé de paramétrisation. Il faut là établir les relations statistiques entre ces processus et des variables à grande échelle que peut manipuler le modèle. Parmi les processus et variables qui doivent être paramétrés, figurent l'évaporation, la précipitation et les caractéristiques des nuages et de la surface du sol. Les modèles doivent aussi tenir compte des complexes mécanismes de rétroaction qui jouent entre les divers processus.

La figure 21 présente une description très simplifiée des éléments qui sont typiquement inclus dans un MCG. L'incertitude qui plane sur la meilleure façon de représenter ces processus et rétroactions est une des grandes raisons pour lesquelles différents modèles peuvent diverger considérablement sur les conséquences d'un même changement imposé au système; c'est aussi pourquoi on ne peut pas encore considérer les résultats des expériences faites avec ces modèles comme des prédicteurs fiables des climats futurs.

Bien sûr, la meilleure façon de savoir si un modèle peut vraiment simuler la réalité, c'est en définitive de vérifier s'il peut reproduire des changements qui sont déjà survenus. On peut par exemple lui faire simuler le climat actuel. Si les résultats s'écartent beaucoup des données d'observation, on devra conclure que le modèle ne sera pas plus valide pour d'autres expériences. La plupart des MCG présentement utilisés dans l'étude du changement climatique simulent assez bien les climats actuels. Aucun d'entre eux, par contre, ne peut être considéré comme d'une haute précision, surtout en ce qui concerne les climats régionaux, même si certains sont plus satisfaisants que d'autres.

Grâce aux MCG, nous comprenons beaucoup mieux l'évolution probable des climats. Notre connaissance est cependant loin d'être totale, et bien des aspects du changement climatique à venir restent douteux. Les scientifiques sont convaincus que la réponse à ces questions passe par le recours à des ordinateurs beaucoup plus puissants, qui ne sont pas encore développés, et par une meilleure compréhension de certains des processus physiques du climat. Ces progrès scientifiques pourraient cependant demander au moins une autre décennie de recherche.

**Figure 21**
**Principaux éléments d'un modèle de circulation générale**




SOURCE : Gates, 1985.

## Les résultats des expériences avec les modèles

Que nous enseignent les expériences des MCG sur le genre de climat que pourrait causer l'accentuation de l'effet de serre?

L'expérience la plus couramment faite (effectuée plusieurs fois, avec un bon nombre de modèles différents) simule une atmosphère dans laquelle la concentration de dioxyde de carbone est le double de celle qui régnait avant la période industrielle. On n'a pas toujours obtenu des résultats cohérents d'une expérience à l'autre; il en est cependant ressorti certains points communs (tabl. 2). Parmi les conclusions les plus fiables, les suivantes sont considérées comme les plus importantes :

- Le doublement des concentrations de dioxyde de carbone entraînera un réchauffement moyen de la température de surface du globe qui sera considérable (1,5 à 4,5 °C), dépassant probablement tout ce qu'a connu l'humanité.

- Ce réchauffement sera nettement plus marqué dans les régions polaires en hiver.

- On constatera une augmentation des taux moyens de précipitation et d'évaporation à l'échelle de la planète. Il est très probable que la teneur en humidité des sols en été sera plus basse aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, et que les régions polaires connaîtront des hivers généralement plus humides.

Par contre, certains autres aspects du climat futur ont été plus difficiles à prévoir, entre autres la distribution des précipitations; en effet, c'est en grande partie la trajectoire des perturbations qui la détermine. Or, cette dernière dépend de configurations de circulation extrêmement com-

**Tableau 2**
**Résultats des expériences d'un doublement du $CO_2$**

| Facteur climatique | Nature du changement | Accord |
|---|---|---|
| Température globale | – Au moins 1 °C de plus | – Haut |
| | – Réchauffement plus grand vers les pôles | – Haut |
| | – Environ 3 °C de plus | – Moyen |
| Température locale | – Varie avec l'endroit | – Bas pour endroit précis |
| Précipitations et évaporation globales | – Augmentation petite à modérée | – Haut |
| | – Grandeur de l'augmentation | – Bas (prévisions de 3 à 15 %) |
| Précipitations locales | – Varie avec l'endroit | – Bas pour endroit précis |
| Humidité du sol | – Été plus sec aux latitudes moyennes | – Moyen à bas |

SOURCE : Centre climatologique canadien.

plexes, que les MCG ne peuvent pas reproduire avec suffisamment de détail. On ne peut donc pas se fier totalement aux prévisions des MCG sur les modifications des trajectoires de perturbations, ni par conséquent à celles des configurations locales de précipitations. Il n'en est pas moins évident qu'il y aura de grands changements dans la distribution des précipitations d'un endroit à l'autre. De plus, à mesure que certaines régions deviendront plus sèches et d'autres plus humides, les conditions climatiques régissant la croissance naturelle de la végétation dans le monde seront profondément modifiées.

Une autre insuffisance des expériences actuelles avec les MCG tient à ce qu'ils ne peuvent pas encore décrire avec précision de quelle manière le système climatique réagira dans le temps à des augmentations graduelles du dioxyde de carbone. Les expériences «sous doublement du $CO_2$» considèrent une atmosphère dans laquelle les concentrations de dioxyde de carbone, bien que nettement plus élevées qu'actuellement, sont stables.

Pour simuler les changements qui se produiraient alors que le $CO_2$ augmente jusqu'à doubler, les modélisateurs devront prendre en compte l'effet «retardateur» des océans qui absorberont une partie de la chaleur supplémentaire de l'atmosphère. Les modèles simples des réactions aux étapes transitoires laissent penser que les océans peuvent retarder de plusieurs décennies, voire plus, le plein impact du renforcement de l'effet de serre. Des expériences plus complexes sur ces réactions transitoires sont actuellement en cours, mais il faudra probablement encore une dizaine d'années pour qu'on puisse en toute confiance en accepter les résultats.

Certes, les MCG nous donnent une idée des effets d'une augmentation des concentrations de dioxyde de carbone (ou des effets équivalents résultant de l'augmentation d'autres gaz à effet de serre); il y a néanmoins bien d'autres facteurs qu'ils ne prennent pas en considération. D'autres forces naturelles, comme d'importantes éruptions volcaniques ou des variations du rayonnement solaire, ont par le passé influé sur le climat et continueront de le faire dans les décennies et les siècles à venir. À certains moments, ces forces pourront causer un réchauffement encore plus rapide; à d'autres, elles pourront ralentir, ou même renverser, le processus.

Certaines activités humaines, en plus de celles qui renforcent déjà l'effet de serre, pourront aussi avoir leur importance. Les nouvelles utilisations des terres, la quantité accrue de particules fines dans l'atmosphère, les polluants atmosphériques dans l'Arctique et les détournements d'eau à grande échelle, ce sont tous là des facteurs qui peuvent avoir des effets climatiques locaux et même, dans certains cas, planétaires. Nos meilleures estimations scientifiques indiquent cependant que, dans le prochain siècle, le climat de la Terre sera plus marqué par l'accentuation de l'effet de serre que par tous les autres facteurs pris ensemble.

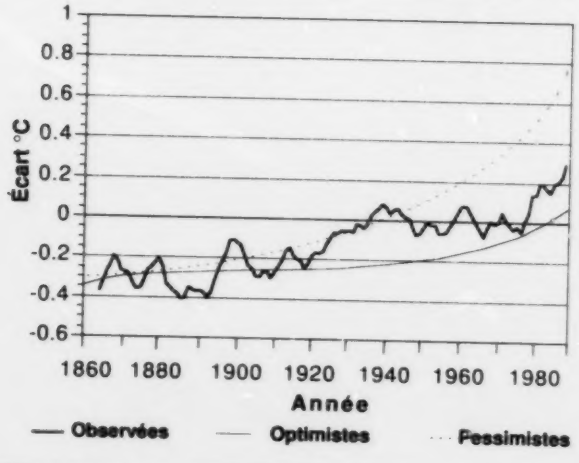
## La Terre se réchauffe-t-elle?

D'après les modèles climatiques simples, l'humanité a libéré dans l'atmosphère au cours des 200 dernières années assez de gaz à effet de serre pour faire monter de 1 à 2 °C la température moyenne de la planète. Cependant, tout comme une chaudière, le système climatique de la Terre, avec ses profonds océans et ses pôles glacés, réagit lentement à ces changements. Tenant compte de cet effet modérateur, les scientifiques estiment que la température moyenne de la Terre aurait déjà dû monter de 0,4 à 1,3 °C dans les 100 dernières années.

Y a-t-il vraiment eu une hausse de température de cet ordre? La réponse est oui, mais à peine. La figure 22 montre que les températures du globe, dans les 100 dernières années, se sont élevées d'environ 0,5 °C, soit un peu au-dessus de l'extrémité inférieure de la gamme prévue.

Cela suffit-il à confirmer que l'accroissement de l'effet de serre influence déjà le climat mondial? Certains scientifiques avancent que oui, mais la plupart s'accordent à dire qu'il est trop tôt pour en tirer des conclusions formelles.

**Figure 22**
**Tendances des températures globales prévues par les modèles et observées**




SOURCE : Wigley et Barnett, 1990.

Les augmentations de la température globale au cours des 100 dernières années sont juste au-dessus des valeurs les plus basses prévues par les MCG. Le trait épais représente les tendances globales observées; les traits minces, les tendances les plus pessimistes et optimistes des MCG. La ligne 0° montre la température annuelle moyenne globale de 1950 à 1979.

La tendance des températures des 100 dernières années, quoique conforme aux prévisions d'un réchauffement attribuable à l'effet de serre, reste néanmoins dans les limites des fluctuations naturelles que le climat a connues depuis 1 000 ans et pourrait donc s'expliquer par des causes strictement naturelles. Il faudrait que la température globale continue de monter pendant encore au moins dix ans pour qu'on puisse dire avec certitude que le climat de la Terre a commencé à réagir à l'accentuation de l'effet de serre.

*Chapitre 4*

# Une planète plus chaude

L'aire de distribution des espèces vivantes est déterminée par des conditions climatiques propres à chacune, sans lesquelles elles ne peuvent se multiplier ou risquent de disparaître. La température de l'air et du sol, la nature et la quantité des précipitations et leur variabilité, la force du vent, la quantité de rayonnement solaire et d'autres facteurs climatiques déterminent quelles espèces occuperont une région donnée. Les grandes différences observées entre les nombreuses zones de végétation — de la toundra et de la forêt boréale aux prairies et à la forêt tropicale humide — et leur diversité témoignent de l'importance du climat dans la répartition des espèces. Chaque région peut être considérée comme une entité écologique distincte, ou écozone, dont les caractéristiques sont largement tributaires de l'écoclimat correspondant propre à chacune et duquel dépend la survie des espèces présentes.

Quand les climats locaux et régionaux changent, comme cela s'est souvent produit dans le passé, les limites des écozones changent aussi, donnant lieu à des ajustements au sein des écosystèmes. Les espèces qui ne sont pas adaptées à ces nouvelles conditions vont occuper d'autres régions ou disparaissent, tandis que d'autres, autrefois absentes, y apparaissent. Le changement climatique incite la migration tant des plantes que des animaux. Si les changements sont graduels, les perturbations seront très peu importantes. Par contre, s'ils sont brusques, la transformation peut être spectaculaire et entraîner la disparition de certaines espèces.

Les sociétés humaines, tout comme les écosystèmes naturels, sont adaptées aux caractéristiques climatiques régionales. Notre mode de vie et notre capacité de se maintenir, notre culture et notre économie et, tout particulièrement, nos sources d'alimentation dépendent en partie du climat. Dans le passé, les populations ont appris à réagir et à s'adapter à des fluctuations de climat qui s'étendaient sur de longues périodes. Dans certains cas, ces fluctuations ont été le moteur de l'avancement social et technologique. Dans d'autres, les populations, n'ayant pu s'adapter, ont été plongées dans l'adversité ou se sont même retrouvées dans des situations catastrophiques.

Comme il se pourrait que d'ici vingt ou trente ans les températures à la surface de la Terre s'élèvent à des sommets jamais atteints au cours des 10 000 dernières années, on ne peut vraiment compter sur les données historiques pour prévoir les effets des changements climatiques futurs. Comment peut-on alors se faire une idée des effets de changements si rapides et si vastes sur les écosystèmes naturels et les sociétés humaines?

Les projections obtenues au moyen des modèles climatiques sont encore beaucoup trop incertaines pour nous aider à prévoir avec précision les effets locaux du changement climatique sur la végétation ou les menaces qui pèsent sur la santé et le bien-être des êtres humains. Cependant, ces modèles nous fournissent les éléments nécessaires à l'élaboration de scénarios plausibles permettant d'évaluer les effets de ces changements sur la nature et la société. De nombreuses études, mettant à l'essai diverses hypothèses, ont été menées récemment par des scientifiques. Leurs résultats, combinés à ceux des recherches sur les effets des changements climatiques du passé, fournissent d'importants indices pour repérer les écosystèmes et les secteurs de la société les plus vulnérables et ceux qui peuvent le mieux s'adapter ou qui sont les moins sensibles à ces changements. Bien que ces résultats doivent être considérés avec prudence, ils brossent tout de même un tableau des éventuelles conséquences du changement climatique pour la nature et les sociétés humaines, dans le monde et en particulier au Canada.

## Les écosystèmes naturels

Sur les continents, les écosystèmes naturels, particulièrement les forêts, seront probablement les plus touchés par le réchauffement climatique. Si les changements sont lents (moins de 0,1 °C tous les dix ans), leurs effets se feront sentir dans les régions extérieures plus chaudes et plus sèches de ces écosystèmes, lesquels arriveront généralement à s'adapter en migrant au rythme du changement climatique comme cela s'est produit dans le passé. Sous les hautes latitudes, par exemple, les limites de différentes écozones forestières se déplaceraient graduellement vers les pôles au rythme d'environ 100 km pour chaque augmentation de la température de 1 °C. Par contre, si le réchauffement est plus brusque (soit de l'ordre de 0,8 °C aux dix ans), la plupart des espèces connaîtraient une chute abrupte de leur succès de reproduction et des taux de mortalité accrus. Ces espèces dépériront à une vitesse telle qu'elles n'auront pas le temps de s'adapter aux nouvelles conditions ni de migrer vers un environnement qui leur serait plus favorable.

## L'agriculture

Le dioxyde de carbone étant une substance nutritive pour les plantes, un accroissement de sa concentration dans l'atmosphère a probablement un effet positif sur la croissance de la plupart des plantes, du moins des plantes agricoles cultivées dans des conditions contrôlées. Non seulement le dioxyde de carbone peut-il favoriser la croissance des plantes, il peut aussi leur permettre d'utiliser l'eau plus efficacement, augmentant ainsi leur tolérance à la sécheresse. Ces effets varient avec les espèces. Certaines plantes, comme le maïs et la canne à sucre, réagissent très peu à une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone. D'autres, cependant, dont des céréales comme le blé et le riz, voient leur rythme de croissance augmenter considérablement. Malheureusement, c'est aussi le cas d'un grand nombre de mauvaises herbes. Par ailleurs, on ne connaît pas encore très bien les effets d'un accroissement du dioxyde de carbone sur la végétation dans les milieux naturels où de nombreuses espèces se disputent l'espace nécessaire à leur croissance. On ne sait pas non plus avec certitude si les plantes qui ont poussé dans une atmosphère enrichie en dioxyde de carbone sont aussi nutritives.

Les effets du réchauffement climatique sur la production alimentaire mondiale seront variables. Ils dépendront largement de la manière dont seront modifiées les configurations des précipitations régionales, mais, aujourd'hui, on ne peut prévoir avec certitude et précision la distribution, l'intensité et la variabilité futures des précipitations. Sous les hautes latitudes, comme dans certaines régions nordiques du Canada, de la Scandinavie et de l'URSS, le réchauffement climatique devrait favoriser la croissance des plantes et permettre l'extension de l'agriculture dans des régions où les sols sont cultivables, mais où pour l'instant le climat n'est pas favorable.

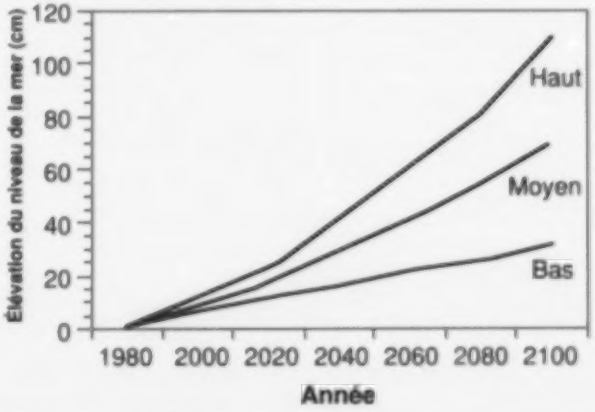
Sous les latitudes moyennes, comme dans le sud du Canada, il est probable qu'il y ait des changements de la productivité dans certaines régions. Là où les avantages de saisons de croissance plus chaudes et plus longues seront renforcés par un accroissement de l'humidité du sol, la productivité augmentera. Cependant, les sols d'autres régions deviendront plus secs et la productivité pourrait y être réduite. On projette que des perturbations locales importantes pourraient affecter ces latitudes, où les conditions seront de façon générale plus sèches, et particulièrement les régions de l'intérieur du pays. Cependant, si les changements ne sont pas trop rapides, de nouvelles méthodes agricoles pourraient permettre aux régions des latitudes moyennes de maintenir leur production alimentaire nette. Les probabilités accrues de phénomènes extrêmes comme les inondations, les sécheresses et les vagues de chaleur posent un problème autrement plus inquiétant. Il sera en effet difficile d'y faire face vu leur ampleur et leur imprévisibilité.

De toutes les parties du monde, les tropiques sont *probablement les plus menacées par le réchauffement climatique*. Dans la plupart des régions tropicales, la distribution des précipitations varie beaucoup d'une saison et d'un endroit à l'autre. L'agriculture est déjà très difficile à pratiquer dans certaines régions et une légère modification du régime pluvial y a des effets très marqués. Les projections des modèles climatiques indiquent que le réchauffement ferait augmenter les précipitations dans la plupart des régions tropicales. Cependant, les éventuels effets bénéfiques des précipitations accrues seraient annulés par l'accroissement du taux d'évaporation, particulièrement dans les zones semi-arides. De fait, il est probable que la sécheresse, et les fléaux de la malnutrition et de la famine qui l'accompagnent, y sévironnt encore plus durement qu'aujourd'hui. De plus, on s'attend à un accroissement de la fréquence et de l'intensité des tempêtes tropicales. S'abattant sur des régions qui jusqu'alors en avaient été épargnées, l'ampleur des inondations et des dommages dus au vent qu'elles provoquent pourrait aussi s'y accroître.

## Les régions côtières

Le niveau moyen des océans du monde a monté lentement au cours des 100 dernières années, de presque 1,5 cm tous les dix ans. Il semble que ce processus devrait s'accélérer avec le réchauffement climatique. Il se pourrait qu'à l'avenir le niveau des mers s'élève à un rythme se situant entre 3 et 10 cm aux dix ans. Pour l'instant, les meilleures estimations donnent une valeur de 6 cm comme

**Figure 23**
**Taux estimés de l'élévation du niveau des océans jusqu'en 2100**




SOURCE : Warrick et Oerlemans, 1990.

la plus probable (fig. 23). Cette élévation est principalement attribuable à l'expansion thermique de l'eau de mer et à la *fonte des glaces continentales*. *Au milieu* du siècle prochain, il est probable que le niveau des océans aura monté de 35 cm, et peut-être même de 60 cm.

La population humaine est plus que vulnérable à de tels changements. Approximativement le quart de l'humanité habite des régions côtières. Ces dernières sont déjà grandement touchées par la flambée démographique, la pollution, le détournement des eaux des hautes terres, les inondations et l'érosion des côtes. Actuellement, la mer empiète progressivement sur environ 70 % des plages de la planète. Une élévation importante de son niveau aggraverait sérieusement ces problèmes. Au nombre des effets néfastes auxquels on peut s'attendre, on compte :

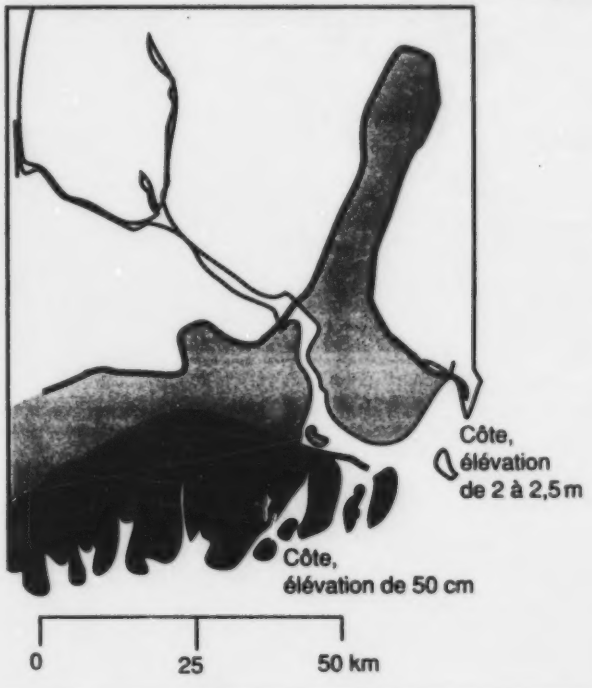
- un accroissement de l'érosion des plages et des pertes de terres humides côtières;
- une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des inondations côtières lors des marées hautes et de tempêtes;
- un endommagement des ouvrages côtiers, des installations portuaires et des systèmes de gestion des eaux;
- la perte de terres agricoles.

Nombreux sont les pays qui pourront prévenir ces problèmes en construisant différentes structures comme des digues et des murs parallèles aux côtes; ces constructions coûteront cependant fort cher. Aux États-Unis, par exemple, la protection complète de la côte est contre une élévation de 1 mètre du niveau de l'Atlantique coûterait, a-t-on estimé, entre 10 et 100 milliards de dollars. Les Pays-Bas, déjà dotés d'une infrastructure élaborée et coûteuse de protection, devraient investir des milliards de dollars supplémentaires pour se protéger contre une élévation du niveau de la mer du même ordre.

Ce sont cependant les pays dont les côtes basses sont en grande partie impossibles à protéger qui souffriront le plus de l'élévation du niveau de la mer. L'empiétement de la mer et la hauteur accrue des marées de tempête entraîneront des dommages matériels et des pertes de terres et de vies. Des pays comme les Maldives, chapelet d'îles de l'océan Indien dont le point le plus élevé n'est qu'à environ 6 m au-dessus du niveau actuel de la mer, pourraient éventuellement être rayés de la carte; d'autres, comme l'Égypte et le Bangladesh, dont la plus grande partie de la population vit dans les basses terres deltaïques, pourraient perdre une portion importante de leurs terres habitables (fig. 24).

À long terme, on pense que la calotte glaciaire de l'ouest de l'Antarctique pourrait glisser dans l'océan en raison de la hausse de la température des eaux environnantes.

**Figure 24**
**Effets de l'élévation du niveau de l'océan sur les côtes du Bangladesh**




SOURCE : McKay et Hengeveld, 1990.

La fonte complète de cette masse de glace entraînerait, à l'échelle de la planète, une élévation du niveau des mers de 5 à 6 m. Ce phénomène ne devrait cependant pas se produire avant plusieurs siècles et, s'il se produisait, il prendrait des dizaines d'années.

## Les autres impacts

Les impacts du changement climatique sur le niveau des mers, l'agriculture et les écosystèmes naturels seront certes les plus sérieux pour l'humanité, mais il faut aussi s'attendre à d'autres graves conséquences dont :

- des hautes latitudes moins hostiles et plus accessibles en raison de l'adoucissement des hivers et du recul des glaces vers les pôles;
- des changements dans la distribution et la productivité des organismes marins en raison de l'élévation des températures et du bouleversement des courants;
- une aggravation des problèmes dus aux maladies et aux insectes tropicaux qui migreront vers les latitudes

## Le dioxyde de carbone et les plantes

Le dioxyde de carbone n'est pas seulement un gaz à effet de serre : c'est aussi une substance nutritive pour les plantes. Par le processus de la photosynthèse, ce gaz atmosphérique est absorbé par les pores des feuilles, les stomates, et entre dans la production de composés carbonés, comme la chlorophylle et les sucres, lesquels sont emmagasinés dans les tissus des végétaux.

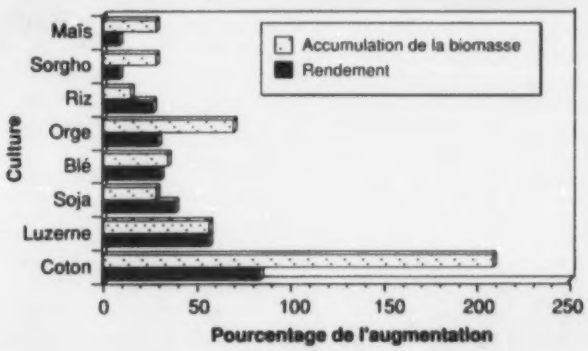
Des expériences de laboratoire ont montré que la croissance de la plupart des plantes est de beaucoup accélérée si l'on en augmente la concentration de dioxyde de carbone jusqu'à trois fois la normale dans l'atmosphère. On a également observé que, dans de telles conditions, les plantes deviennent plus tolérantes à la sécheresse parce qu'une plus grande concentration de dioxyde de carbone provoque une fermeture partielle des stomates, réduisant ainsi le taux d'évaporation de l'eau des feuilles.

L'accroissement du taux de croissance des plantes varie cependant beaucoup d'une espèce à l'autre. Chez certaines, la fixation des molécules de dioxyde de carbone donne d'abord lieu à la formation de composés organiques comportant trois atomes de carbone. La croissance de ces plantes (connues sous le nom de plantes en C3) est grandement stimulée par un doublement de la concentration de dioxyde de carbone en laboratoire, le rendement de certaines d'entre elles augmentant de 50 %. Le blé, le riz, les pommes de terre et la plupart des autres végétaux destinés à l'alimentation appartiennent à cette catégorie.

Cependant, les espèces chez lesquelles la fixation du dioxyde de carbone produit d'abord des composés organiques à quatre atomes de carbone (plantes en C4) sont beaucoup moins sensibles à l'augmentation du dioxyde de carbone. La croissance et le rendement de ces plantes, dont le maïs, le sorgho, la canne à sucre et le millet — plantes alimentaires importantes sous les tropiques — augmentent très peu quand elles sont exposées à un doublement de la concentration du dioxyde de carbone.

On ne sait pas encore comment ces plantes réagiront à un accroissement de la concentration de dioxyde de carbone hors du laboratoire, quand interviennent bien d'autres facteurs. Dans les écosystèmes naturels, par exemple, les espèces les plus avantagées par cet accroissement supplanteront les autres. Ainsi, beaucoup d'écosystèmes pourraient voir leur composition naturelle changée de façon importante. Dans les cultures, la réduction de la transpiration des plantes réduira le taux d'humidité de l'air environnant. Ce faisant, même si la tolérance à la sécheresse de la plupart des végétaux sera accrue, ils seront peut-être exposés à des conditions de sécheresse plus sévères. Le problème des mauvaises herbes s'en trouvera également accru, étant donné que leur croissance est stimulée de façon importante par l'accroissement de la concentration de dioxyde de carbone.

Enfin, des travaux de recherche récents laissent entendre que cette éventuelle importante augmentation du volume de la production végétale dû à l'accroissement du dioxyde de carbone pourrait être accompagnée d'une réduction de la qualité nutritive des végétaux, lesquels seraient alors plus riches en carbone, mais renfermeraient moins d'azote. On a observé, par exemple, que les ravageurs devaient consommer nettement plus de cette matière végétale plus riche en carbone pour maintenir leur taux de croissance normal.




moyennes en suivant le réchauffement climatique;

- une baisse de la disponibilité et de la qualité de l'eau dans beaucoup de régions;
- une intensification ou, dans certains cas, une réduction du stress imposé aux écosystèmes par d'autres sources de pollution;
- le stress thermique chez les humains.

## Les implications pour la sécurité du globe

Des changements dans la production agricole, du niveau des mers ainsi que d'autres effets directs d'un réchauffement global peuvent aussi entraîner un nombre de répercussions secondaires alarmantes. Il est plus que certain que la sécurité économique et sociale de la planète est la répercussion la plus alarmante.

L'accès à la nourriture et à l'eau est le plus fondamental de tous les problèmes de l'humanité. Et pourtant, on n'est pas encore certain de ce que sera le résultat d'un réchauffement global sur la production alimentaire et les ressources en eau potable. Il pourrait être minime, même positif. Cependant, il est presque certain que la distribution régionale de ces nécessités changera dramatiquement, ce qui augmentera les incertitudes présentes quant à la sécurité alimentaire et hygiénique. Le tiers monde, plus que partout ailleurs, en subira les conséquences, étant incapable de subvenir aux coûts de remplacement des ressources alimentaire et aquatique déficitaires.

Un développement social et économique durable sera entravé par des changements environnementaux importants, surtout si ces derniers entraînent des désastres majeurs pour les populations des régions touchées. Dans le passé, de tels effets ont conduit à des guerres et à des migrations massives; ils pourraient se répéter dans le futur. Il est au moins certain que les famines et autres crises environnementales demandent un transfert énorme de fonds d'aide aux pays affectés, comme nous le rappellent les dernières années.

Dans notre monde de plus en plus petit, les problèmes environnementaux ne sont plus un fait local, ils deviennent vite les problèmes de tous et chacun.

*Chapitre 5*

# Un Canada plus chaud

Au cours de la dernière décennie, des scientifiques œuvrant dans le cadre du Programme climatologique canadien ont effectué des évaluations préliminaires des effets possibles du changement climatique sur l'environnement, la société et l'économie. Leurs analyses étaient fondées sur des projections obtenues au moyen de MCG et utilisées pour évaluer les modifications possibles des caractéristiques générales du climat. L'intégration de données climatiques historiques à ces projections leur a permis d'en savoir davantage sur la manière dont pourraient être modifiées les conditions météorologiques proprement dites et de calculer la fréquence probable des phénomènes extrêmes, comme les vagues de chaleur ou de froid et les périodes de sécheresse ou de précipitation abondante. Le texte de ce chapitre est largement fondé sur ces études.

## Les forêts

Le territoire canadien est en grande partie couvert d'arbres d'essences variées, de l'épinette noire et du bouleau des froides forêts boréales au pin et aux feuillus des forêts méridionales plus chaudes et recevant plus de précipitations. Le climat est en partie responsable de l'absence de la forêt de deux grandes régions : les Prairies, dont le sol a un faible taux d'humidité, et la toundra, au nord, où les températures sont trop basses.

Vu l'abondance des ressources forestières au Canada, il n'est pas surprenant que l'industrie du bois y soit la plus importante. Selon Statistique Canada, les compagnies forestières, qui exploitent cette ressource pour en tirer divers produits, génèrent des revenus dépassant 45 milliards de dollars et emploient plus de 280 000 personnes. Par ailleurs, écologiquement, les forêts ont une grande importance. Elles fournissent des habitats nécessaires à la survie d'une multitude d'animaux sauvages, jouent un rôle important dans les processus hydrologiques et radiatifs du système climatique et renferment une grande partie du carbone organique de la planète. C'est pourquoi le maintien de leur intégrité est primordial non seulement pour l'économie du pays, mais aussi parce qu'elles participent aux processus naturels fondamentaux de la biosphère.

De façon générale, l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone atmosphérique, l'allongement et le réchauffement des saisons de croissance et l'adoucissement des hivers devraient augmenter considérablement la productivité des forêts. Par exemple, selon les prévisions climatiques pour le milieu du siècle prochain, les forêts québécoises pourraient voir leurs rendements annuels s'accroître de 50 à 100 %. Cependant, les limites des différents types de forêt seront profondément modifiées (fig. 25). Il en résultera une réduction de la superficie totale des forêts, principalement en raison de la baisse du taux d'humidité du sol dans la région des Prairies qui favorisera l'expansion de ces dernières vers le nord et vers l'est.

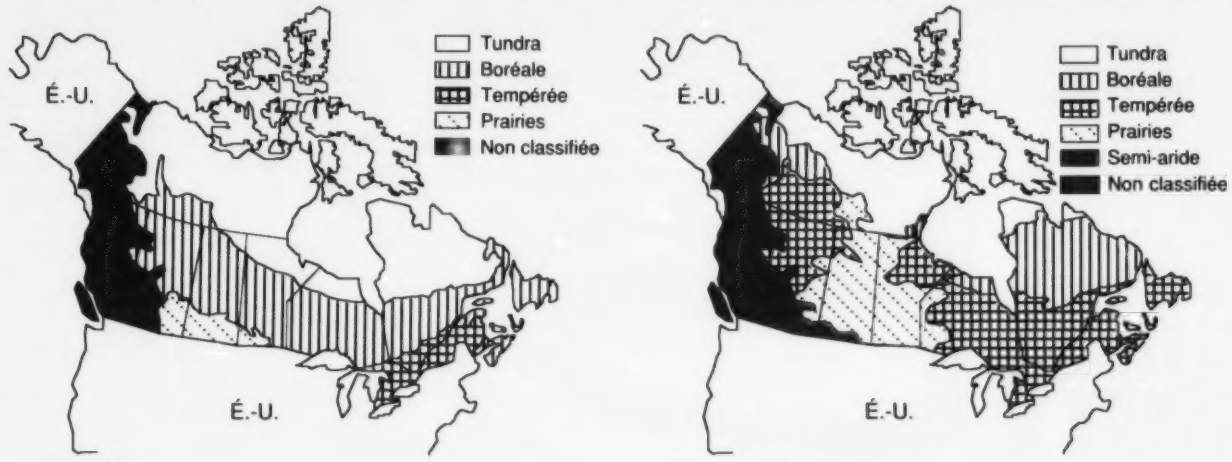
Le territoire couvert par la forêt boréale devrait connaître les plus grands bouleversements. À leurs limites sud-est, les feuillus et les conifères des forêts tempérées devraient progressivement s'étendre au nord pour remplacer l'essence dominante, l'épinette noire. Par ailleurs, la migration de ces limites nord vers la toundra serait grandement entravée par la pauvreté des sols et la lente dégradation du pergélisol sous-jacent.

La gravité de ces changements dépendra dans une large mesure du rythme auquel ils se produiront. On peut s'attendre à ce que chaque élévation de la température de 1 °C fasse déplacer les zones thermiques du Canada d'environ 100 km vers le nord. Comme plusieurs espèces d'arbres ne peuvent se déplacer de plus de 700 m par année quand elles sont exposées à des changements climatiques, les espèces en recul ne pourront être rapidement remplacées par celles qui avancent, ce qui assure des transitions en douceur d'un type de forêt à un autre, que si le changement climatique est très graduel. Malheureusement, selon les modèles climatiques, les températures et les précipitations devraient changer très rapidement. Si c'est bien le cas, les conséquences risquent d'être graves, particulièrement aux limites méridionales des espèces, là où l'humidité du sol est tout juste suffisante pour leur permettre de se développer.

Les forêts exposées à des stress supplémentaires, comme ceux infligés par les pluies acides, la pollution par l'ozone au niveau du sol, l'accroissement du rayonnement ultraviolet et le lessivage de produits chimiques dangereux présents dans le sol, pourraient être endommagées à grande échelle. Le dépérissement récent de certains peuplements d'érables en Ontario et au Québec en est peut-être un signe avant-coureur.

Aussi, le réchauffement climatique attirera dans nos forêts des maladies et des ravageurs nouveaux en prove-

**Figure 25**
**Modifications des limites des forêts et des prairies dues à un doublement du $CO_2$**




SOURCE : Rizzo, 1991.

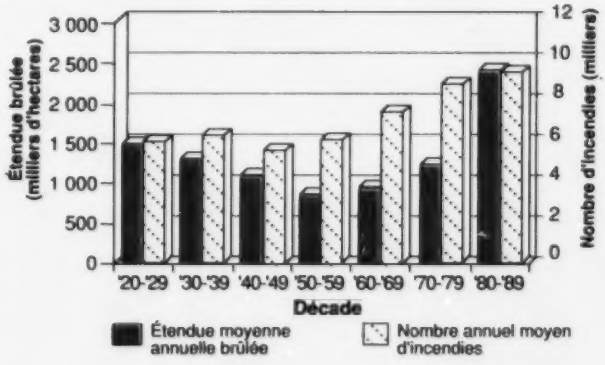
nance du sud, augmentant les risques d'infestations d'insectes et d'épidémies. De plus, l'augmentation des quantités de matière végétale morte, combinée à des étés plus secs, pourrait accroître considérablement la fréquence et l'ampleur des incendies de forêts. De fait, leur nombre s'est déjà accru au cours des années 80, qui ont été chaudes et sèches (fig. 26). Enfin, la destruction du manteau forestier aura pour effet d'augmenter la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, accélérant ainsi le réchauffement du globe.

## L'agriculture

Le potentiel agricole du Canada est limité, entre autres, par son climat froid. Les périodes de croissance, c'est-à-dire où le gel ne sévit pas, n'y sont que d'environ 200 jours dans sa partie la plus méridionale et de quelques semaines seulement par année dans l'extrême nord; les sols restent donc improductifs une bonne partie de l'année. De plus, la rigueur des hivers est telle que le gel peut endommager la végétation même une fois entrée en dormance, ce qui limite l'utilisation de cultures qui passent l'hiver dans le sol, comme le blé d'hiver, dans les Prairies et d'autres régions soumises à un régime climatique semblable. Durant la saison de croissance, la quantité d'énergie thermique que les plantes reçoivent est plutôt réduite et limite donc leur taux de croissance. Ces contraintes font que les types de plantes agricoles cultivables sont passablement restreints, de même que les rendements et le nombre de récoltes par année.

On pourrait donc s'attendre à ce que le changement climatique bénéficie à l'agriculture canadienne. En effet, selon les scénarios climatiques établis pour 2050, la durée des saisons de croissance des régions de Whitehorse et de Yellowknife serait du même ordre que celle de la région

**Figure 26**
**Nombre moyen de feux de forêt et d'étendues forestières brûlées par année (par décennie)**




SOURCE : Stocks, 1991.

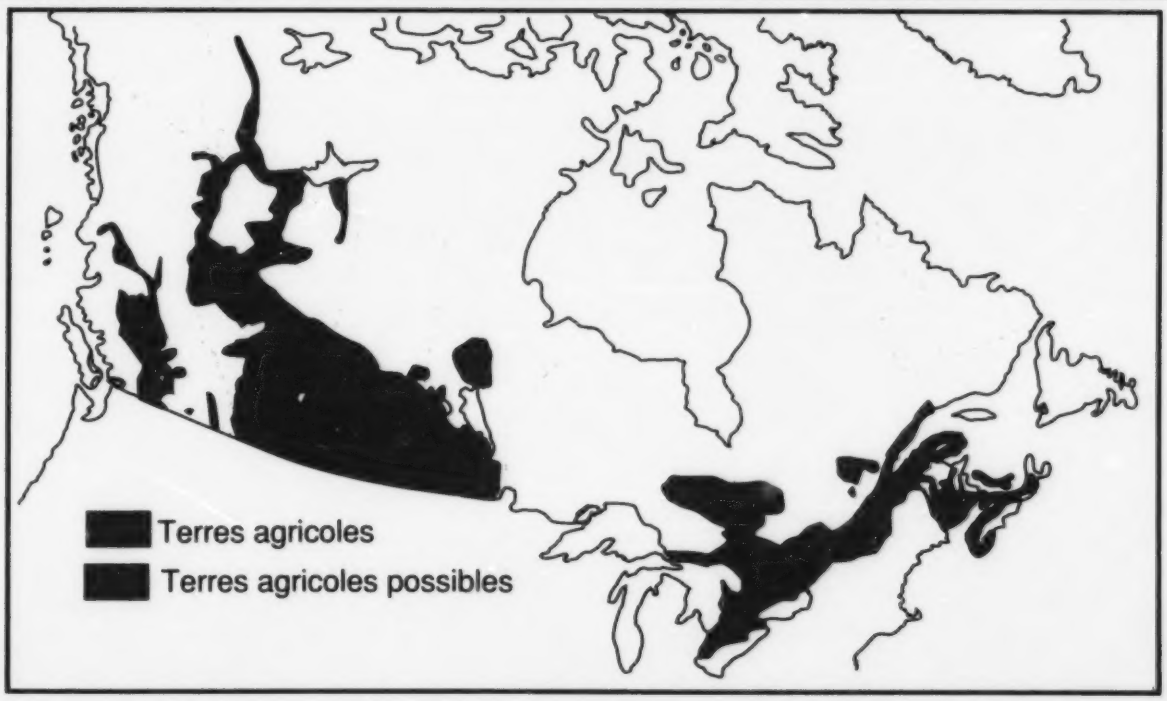
d'Edmonton actuellement, et le Nouveau-Brunswick connaîtrait des conditions semblables à celles de la péninsule de Niagara.

Grâce à l'élévation des températures, le potentiel de croissance de la végétation dans des régions comme celles du centre de l'Ontario et du sud du Québec et de la Saskatchewan augmenterait de 40 à 50 %, si tous les autres facteurs, comme l'humidité du sol, les infestations d'insectes et autres, restaient constants. Ainsi, les possibilités d'exploitation de cultures à rendement plus élevé exigeant une saison de croissance plus longue et plus chaude, de cultures successives dans les régions les plus au sud et d'expansion vers le nord de l'agriculture pratiquée dans des conditions limites seraient grandement accrues. D'autres avenues pourraient aussi s'ouvrir : importantes cultures de maïs grain au Manitoba et dans le nord de l'Ontario notamment, culture fructueuse du blé d'hiver dans les Prairies, production élevée de pommes et de raisins au Québec. Par ailleurs, l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone atmosphérique, substance nutritive essentielle à la croissance des plantes, s'ajouterait à ces avantages, augmentant la productivité des cultures de peut-être 15 %, voire plus.

Malheureusement, certains autres facteurs varieront ou s'opposeront aux effets bénéfiques du réchauffement. D'abord, la quantité des sols potentiellement cultivables non exploités pour des raisons climatiques est limitée. Actuellement, ces sols ne totalisent qu'environ 10 millions d'hectares (fig. 27) et une bonne part de ces derniers sont de pauvre qualité et impropres à la culture des céréales. De plus, des peuplement forestiers de grande valeur occupent déjà certains sols propres à l'agriculture. Ainsi, les possibilités d'expansion de l'agriculture vers le nord sont restreintes.

Deuxièmement, comme les changements climatiques ont des effets sur les populations d'insectes et d'autres ravageurs de même que sur l'incidence des maladies des plantes, la probabilité d'infestations et d'épidémies graves augmentera au cours des prochaines décennies. En outre, plusieurs plantes agricoles sont sensibles au stress thermique, particulièrement aux stades critiques de leur

**Figure 27**
**Augmentation possible des terres agricoles par suite du réchauffement global**



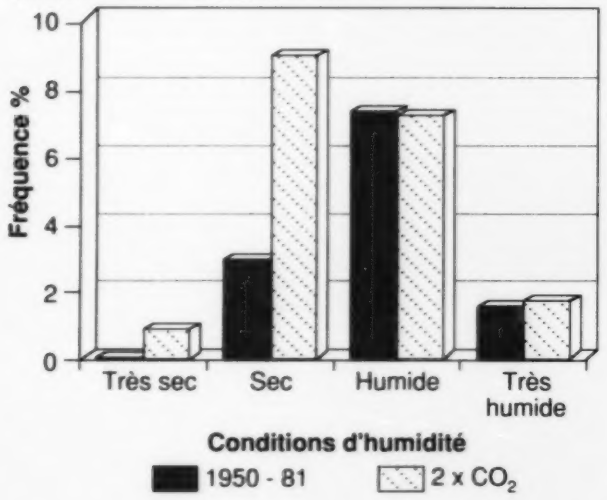

SOURCE : Agriculture Canada.

développement, et pourraient être affectées par les vagues de chaleur plus nombreuses et plus implacables de l'été.

Enfin, le taux d'évaporation de l'eau des plantes et du sol sera nettement accru en raison de l'élévation des températures; les réserves d'eau du sol seront grandement réduites. Dans les régions où les pluies augmenteront de façon importante durant la saison de croissance, ces pertes seront compensées. Cependant, selon des études concernant les sécheresses, même dans ces régions, les années sèches qui surviennent partout de façon normale suivant les variations climatiques annuelles seront plus nombreuses et plus marquées (fig. 28).

Dans les régions où l'on prévoit que les précipitations resteront constantes ou diminueront, les sécheresses seront nettement plus fréquentes et plus intenses, faisant subir aux cultures un stress important et causant des problèmes économiques. Ce pourrait être le cas de nombreuses régions agricoles clés du Canada, dont les Prairies et le sud de l'Ontario et du Québec. De fait, l'été de 1988, où les agriculteurs de la plupart de ces régions ont perdu une bonne partie de leurs récoltes à cause d'une grave sécheresse, est représentatif de ce que pourrait devenir le climat estival moyen du pays. De telles situations ne sont pas sans précédent au Canada, mais elles pourraient se produire plus souvent dans les décennies à venir.

**Figure 28**
**Effets possibles du réchauffement climatique sur l'humidité du sol dans le sud de la Saskatchewan**




SOURCE : Williams *et al.*, 1987.

Le diagramme montre les effets possibles du réchauffement climatique sur les conditions d'humidité du sol dans le sud de la Saskatchewan selon un scénario climatique de prévision type basée sur un doublement du $CO_2$. On estime que dans un tel climat, les années exceptionnellement humides seraient aussi fréquentes que maintenant. De fait, ce scénario prévoit une augmentation de 15 % des précipitations mais, malgré cela, il prévoit aussi un nombre accru d'années avec des périodes sèches ou des sécheresses importantes.

## Les ressources en eau

Bien que les modèles climatiques n'arrivent pas tous aux mêmes résultats en ce qui a trait aux quantités de précipitations que recevront les différentes régions du Canada, les points suivants font l'unanimité :

- Les précipitations hivernales augmenteront probablement au Canada.
- L'hiver sera, toutefois, beaucoup plus court. Dans la plupart des régions, la neige sera moins abondante et la fonte et le ruissellement printaniers plus hâtifs bien que les régions septentrionales puissent recevoir nettement plus de neige.
- Durant la saison de croissance, il est probable que les précipitations augmenteront dans le nord et diminueront ou resteront du même ordre dans le sud, les principales trajectoires de tempêtes se déplaçant vers le nord.

Ces changements auront des impacts importants sur la gestion et l'utilisation de nos ressources en eau. On sait que ce sont les pluies et les chutes de neige qui alimentent, par ruissellement, les cours d'eau, mais que ces précipitations ne les atteignent pas dans leur totalité : grosso modo, une partie des eaux de ruissellement s'évapore, une autre est absorbée par les plantes et une troisième est retenue par le sol. Bon nombre de nos lacs et cours d'eau tirent leur alimentation annuelle en grande partie de la fonte printanière des neiges quand le sol est encore gelé, la végétation en dormance et l'évaporation relativement faible. Les modifications importantes de l'accumulation de neige annuelle, du moment de la fonte et du taux d'évaporation de l'eau des plantes et du sol influeront grandement sur le régime hydrologique et l'état des rivières, des lacs et des réservoirs.

Bien qu'il plane encore trop d'incertitude sur la nature et l'ampleur des modifications des régimes locaux de précipitations pour qu'il soit possible de prévoir les effets du changement climatique sur les ressources en eau des diverses régions du Canada, les simulations des modèles climatiques nous donnent de précieux indices. Elles laissent entendre que les ressources en eau dans le nord du pays

seront probablement plus abondantes, mais que le ruissellement printanier sera vraisemblablement réduit et aura lieu plus tôt. Il pourrait en résulter une bonne augmentation du potentiel de production d'hydro-électricité des bassins hydrographiques dans le nord; le Québec, par exemple, pourrait y voir sa production s'accroître de 15 % ou plus.

Cependant, il se pourrait que ces avantages soient en partie atténués par la nécessité de détourner d'importantes quantités d'eau vers les régions du sud où la demande en eau devrait monter avec l'élévation des températures qui y augmentera l'évaporation et réduira l'humidité des sols. Les sols plus secs retiendraient alors probablement davantage les eaux de ruissellement, dans certains cas de façon très considérable, ce qui diminuerait le débit des cours d'eau et le niveau des lacs. Ces effets seraient particulièrement marqués durant les années de sécheresse.

Selon les scénarios les plus courants, les niveaux des Grands Lacs pourraient baisser en moyenne de 0,5 à 1,0 m ou plus, tandis que le débit du Saint-Laurent subirait une baisse pouvant atteindre 20 %. Quatre années sur cinq, les niveaux des lacs pourraient être très bas, soit de l'ordre de ceux de 1963–1965 (tabl. 3). En plus de réduire la qualité de l'eau, ces changements pourraient aussi accroître considérablement les coûts de navigation, peut-être de 30 %, étant donné que les gros bateaux devraient réduire leur charge pour utiliser les canaux et les voies d'eau peu profonds. Les revenus générés par les centrales hydro-électriques du sud du pays pourraient aussi chuter de 30 à 60 millions de dollars par année. Enfin, beaucoup de terres humides ayant une grande valeur écologique, comme celles de la pointe Pelée sur le lac Érié, disparaîtraient en raison des conditions climatiques plus sèches.

**Tableau 3**
**Fréquence des bas niveaux d'eau dans les Grands Lacs (pourcentage d'années avec des niveaux d'eau égaux ou inférieurs aux niveaux extrêmement bas de 1963-1965)**

| Lac | Historique (1900 – 1979) | Climat $CO_2$ doublé | $CO_2$ doublé plus utilisation accrue de l'eau |
|---|---|---|---|
| Supérieur | 10 | 61 | 79 |
| Michigan | 8 | 57 | 77 |
| Érié | 5 | 38 | 77 |

SOURCE : Sanderson, 1987

## La neige et la glace

La neige et la glace occupent une place importante dans la géographie, le climat et la culture du Canada. Elles recouvrent presque tout le territoire et la plupart des lacs et cours d'eau du pays durant au moins une partie de l'année et, dans certaines régions, toute l'année. La glace du pergélisol, dans le nord, joue un rôle important dans le drainage des eaux, la croissance de la végétation et le maintien de la stabilité du sol. Les glaciers et les calottes glaciaires ont un effet important sur les climats régionaux; ils donnent naissance aux icebergs qui sillonnent la côte est et à des îles de glace dérivant dans l'océan Arctique.

L'élévation des températures et l'accroissement projeté des précipitations hivernales entraîneront des bouleversements importants à ce chapitre. Dans le nord, il est probable que la neige restera moins longtemps mais sera plus abondante. La présence de glaces sur les lacs et dans les océans pourrait être raccourcie de plusieurs mois. Il se pourrait que la baie d'Hudson soit libre de glace toute l'année et que l'océan Arctique le soit pour ainsi dire totalement en plein cœur de l'été. Ainsi, dans les eaux de l'Arctique, la navigation serait beaucoup plus praticable de même que d'autres activités, comme la pêche et l'exploitation d'autres ressources. Cependant, les scientifiques pensent qu'une plus grande accumulation de neige sur les calottes glaciaires de l'Arctique et l'allongement et le réchauffement de la période de fonte sur leurs pourtours entraîneront une accélération de l'écoulement glaciaire et une augmentation du vêlage (processus de formation des icebergs) pouvant atteindre 300 %.

Dans l'intervalle, la dégradation progressive des marges méridionales du pergélisol modifiera considérablement le drainage des eaux de surface et accroîtra l'instabilité du sol. Il pourrait en résulter des dommages importants aux pipelines, voies ferrées, routes et autres ouvrages; les ponts de glace pourraient être particulièrement touchés. Construits sur des terres humides et des lacs gelés, ils constituent une précieuse voie d'approvisionnement pour de nombreuses communautés isolées et donnent accès à de vastes régions forestières de la forêt boréale. Un climat plus doux rendra plus difficile leur construction; il pourrait aussi diminuer leur période d'utilisation de même que leur force portante, vu l'épaisseur réduite de la glace. Dans certaines régions, ils cesseront de représenter un moyen de transport fiable.

Plus au sud, la réduction de la couverture de glace et de neige affecterait grandement plusieurs activités. En gros, on peut dire que le secteur des transports en bénéficierait, les routes exigeant moins de déneigement et les voies d'eau devenant plus facilement et plus longtemps navigables. La plus grande partie des Grands Lacs et du golfe du Saint-Laurent serait probablement libre de glace durant toute l'année et il ne serait pour ainsi dire plus nécessaire de dépenser les millions de dollars que coûte le déneigement de

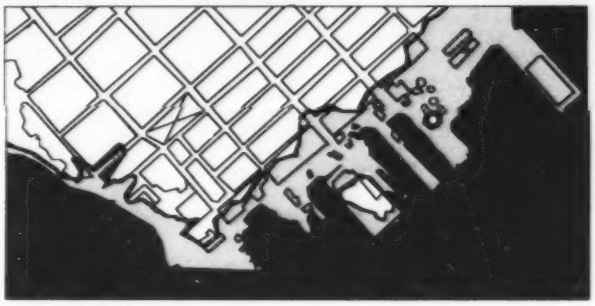
grandes agglomérations urbaines comme Toronto et Montréal. Cependant, la saison des sports d'hiver : ski, motoneige, pêche sur glace et patinage extérieur, serait considérablement écourtée ou, dans le cas du sud de l'Ontario, n'existerait tout simplement plus (tabl. 4). Les industries connexes en souffriraient beaucoup.

## L'inondation des côtes

Comme ses côtes sont accidentées, le Canada est beaucoup moins exposé aux inondations côtières que bien d'autres pays. L'élévation du niveau de la mer n'y serait toutefois pas sans conséquence. Certaines terres humides côtières, comme les basses terres de la baie d'Hudson et le delta du Mackenzie, pourraient être largement inondées. Dans d'autres régions, les eaux empiéteront sur les plages et le littoral et les éroderont.

Ceux qui souffriront le plus, ce sont toutefois les Canadiens des agglomérations populeuses situées le long des côtes atlantique et pacifique, où les habitations et les installations se trouvent presque au niveau de la mer. À mesure que monteront les eaux, on devra, pour prévenir de graves inondations, investir de grosses sommes dans la construction de nouveaux ouvrages de protection ou l'amélioration de ceux qui existent déjà dans la basse ville de Vancouver et d'autres municipalités du delta du Fraser, qui font parfois face aux inondations. À Charlottetown, une élévation de 1 m entraînerait à marée haute l'inondation des nouvelles constructions de la façade portuaire tandis que les fortes marées de tempête, qui ont lieu environ une fois aux vingt ans, seraient suffisamment hautes pour inonder de vastes parties des secteurs résidentiels et commerciaux du centre-ville (fig. 29). À Saint-Jean, au Nouveau-Brunswick, il arriverait souvent que les routes, les voies ferrées et les édifices du centre-ville soient inondés, et que les égouts débordent. D'autres problèmes surviendraient : contamination de l'eau potable, perte de terres agricoles et débordement accru des rivières à l'intérieur des terres à l'époque de la fonte des neiges.

**Figure 29**
**Effets d'une élévation de 1 m du niveau de l'océan sur les inondations à Charlottetown**



SOURCE : Lane, 1986.

L'élévation des niveaux des mers augmentera la fréquence et la rigueur des inondations dans un bon nombre de communautés côtières. Le risque sera le plus grand au cours des marées de tempête, lorsque les marées hautes maximales seront amplifiées par de violentes tempêtes. La ligne foncée indique l'étendue d'une inondation dans le centre-ville de Charlottetown causée par une élévation du niveau de la mer de 1 m et une forte marée de tempête qui peut survenir environ une fois aux vingt ans.

Certains de ces impacts pourraient être réduits ou accentués par le soulèvement naturel du terrain. On sait, par exemple, que la région de la baie d'Hudson subit encore un déplacement vertical, commencé depuis que les glaces de la dernière période glaciaire se sont retirées, et que son littoral s'élève à un rythme comparable à celui de l'élévation prévue du niveau de la mer attribuable au réchauffement climatique. Par ailleurs, la Nouvelle-Écosse s'enfonce progressivement et souffrira donc d'autant plus de toute élévation du niveau de la mer.

**Tableau 4**
**Durée de la saison de ski en Ontario et au Québec (jours)**

| Endroit | Climat actuel | Climat $CO_2$ doublé |
|---|---|---|
| Thunder Bay | 131 | 80 |
| Québec | 109 | 63 |
| Sherbrooke | 97 | 51 |
| Baie Georgienne, sud | 70 | 0 |

SOURCE : Centre climatologique canadien.

## Les autres impacts

Comme la plupart des activités sociales et économiques sont tributaires du temps et du climat, le réchauffement climatique au Canada aura bien d'autres effets que ceux mentionnés ci-dessus. En voici quelques-uns qui sont particulièrement importants.

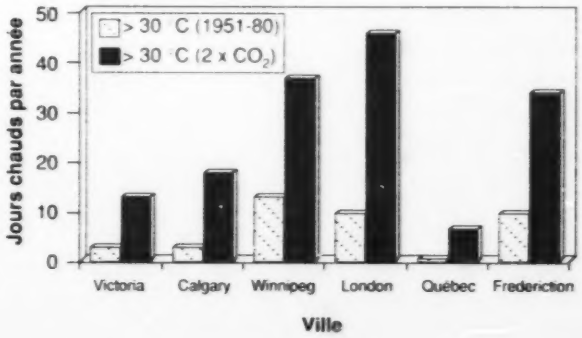
- *Consommation d'énergie.* Les besoins en chauffage pour les habitations, les bureaux et les usines seront considérablement réduits en hiver. Cette baisse pourrait être de 30 % dans les régions les plus chaudes, au

## Le changement climatique et les phénomènes extrêmes

Bien que leurs résultats soient incertains, les MCG nous fournissent des indices raisonnablement fiables du changement probable du climat *moyen* à la surface du globe dans les prochaines décennies. Ce sont cependant les phénomènes extrêmes, comme les sécheresses, les inondations et les vagues de chaleur et de froid, qui sont les plus importants pour les populations humaines et les écosystèmes, étant donné qu'ils représentent de bien plus grands dangers que les changements progressifs du climat. En raison de leur gravité et de leur imprévisibilité, ces phénomènes peuvent plonger les populations dans la détresse, causer des pertes économiques, entraîner d'importants bouleversements sociaux et même des pertes de vie.

La détermination de l'influence du réchauffement climatique sur la fréquence et l'ampleur des phénomènes extrêmes constitue donc une étape clé dans notre compréhension des impacts de l'accroissement anthropique de l'effet de serre, mais, à ce jour, les modèles climatiques ont donné peu de résultats concernant la variabilité des climats futurs. On a cependant obtenu certains indices préliminaires à cet égard en combinant les changements moyens projetés fournis par des modèles climatiques avec des données climatiques détaillées des 30 dernières années.

Il n'est pas surprenant qu'au nombre des effets du réchauffement climatique au Canada on compte une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur en été et une diminution, mais non pas une disparition complète, du nombre de périodes de temps très froid en hiver. À Saskatoon, par exemple, un doublement de la concentration de $CO_2$ atmosphérique pourrait faire passer le nombre de jours où la température dépasse 31 °C en juillet de 3, moyenne annuelle actuelle, à 8. Inversement, le nombre de jours très froids où la température est inférieure à –35 °C en janvier pourrait passer de 3, moyenne annuelle actuelle, à 1 jour aux quatre ans. Par ailleurs, même si le climat moyen du sud de la Saskatchewan devenait plus humide, les sécheresses pourraient y être deux fois plus fréquentes à cause de l'accroissement du taux d'évaporation.




sud, et de 20 % dans le nord, où ces besoins sont particulièrement élevés. Ces économies d'énergie seront cependant en partie contrebalancées par l'accroissement de la consommation pour la climatisation dans les immeubles durant l'été. De façon générale, le réchauffement climatique augmentera aussi l'efficacité des transports terrestres et maritimes et, ce faisant, réduira la consommation d'énergie de ce secteur.

- *Stress thermique*. Le nombre et l'intensité des vagues de froid en hiver seront considérablement réduits chaque année. Cependant, les vagues de chaleur en été seront plus fréquentes et plus intenses.

- *Pêches*. Les températures saisonnières déterminent en grande partie les types de poissons et d'organismes aquatiques présents dans les lacs de même que leur taux de croissance. C'est pourquoi le réchauffement climatique modifiera les populations et la nature des espèces occupant les différentes régions du Canada. De façon générale, les espèces à chair sombre, de moins grande valeur, vont être avantagées tandis que les espèces à chair blanche, plus recherchées, vont connaître une réduction de leurs habitats. Concurremment, les poissons subiront d'autres stress attribuables à des changements de la qualité de l'eau et des réserves nutritives de leurs habitats. Dans les eaux côtières, les modifications de la salinité, de la température et de la circulation des courants affecteront la distribution et l'abondance des espèces marines. La pisciculture tirera probablement avantage du réchauffement du climat.

Il y a beaucoup plus d'incertitudes concernant les impacts sur les pêches hauturières étant donné que celles-ci sont largement tributaires des courants océaniques. Cependant, dans le passé, le réchauffement des océans a favorisé l'expansion d'espèces exotiques vers la côte pacifique et a eu des effets marqués sur l'abondance et la distribution de la morue le long de la côte est du Canada.

- *Sécurité internationale*. Les effets des changements climatiques dans d'autres régions du globe auront de multiples répercussions sur la sécurité économique, sociale et politique du Canada. Le commerce des denrées alimentaires, tel que pratiqué aujourd'hui, sera grandement modifié par la distribution globale de leur production. Le Canada, autant comme exportateur que comme importateur de premier plan, devra s'adapter à ces conditions en trouvant de nouvelles sources d'approvisionnement et de nouveaux marchés.

  Entre-temps, les pénuries alimentaires chroniques ou d'autres désastres dus aux changements climatiques dans les pays sous-developpés augmenteront la pression pour que le Canada fournisse de l'aide d'urgence, accueille les réfugiés environnementaux, et peut-être participe au règlement de conflits armés. De plus, tout en poursuivant un programme domestique de réduction d'émissions de ses propres gaz à effet de serre, dynamique et probablement fort couteux, il devra, avec d'autres pays du monde industrialisé, participer au transfert de ressources techniques et financières aux pays pauvres afin que ces derniers puissent entreprendre de tels programmes.

*Chapitre 6*

# L'appauvrissement de la couche d'ozone

L'ozone ne représente qu'une infime fraction de l'atmosphère. Si on comprimait tout l'ozone de l'atmosphère en une couche de gaz pur à la température et à la pression de la surface de la Terre, l'épaisseur totale n'en serait que de 3 mm, soit celle de trois pièces de 10 cents superposées. Néanmoins, en raison de sa capacité d'absorber le rayonnement ultraviolet du soleil, extrêmement dangereux pour les cellules vivantes, l'ozone est d'une importance vitale pour la plus grande partie de la vie sur Terre. C'est en fait le seul gaz qui absorbe les UV-B, une des plages les plus destructrices du spectre ultraviolet. Se comportant pour la Terre comme un écran contre ce type de rayonnement, la couche d'ozone aide au maintien de conditions adéquates à la vie dans la basse atmosphère.

De plus, l'ozone absorbe le rayonnement infrarouge et contribue à la régulation du flux d'énergie thermique atmosphérique. La concentration et la distribution de ce gaz ont donc une incidence considérable sur la structure thermique de l'atmosphère et sur la circulation des courants aériens autour de la planète.

## La chimie de la couche d'ozone

L'ozone n'est pas distribué uniformément dans l'atmosphère. On en trouve la plus grande partie (80 %) en altitude, entre 15 et 40 km de la surface, la plus grande concentration se situant à environ 25 km (fig. 30). Cette distribution tient à ce que le rayonnement ultraviolet lui-même joue un rôle de premier plan dans la formation de l'ozone. Dans la haute atmosphère, le rayonnement ultraviolet intense force les molécules d'oxygène à se dissocier, donnant des atomes d'oxygène libres qui se fixent ensuite à des molécules d'oxygène pour former l'ozone. À mesure que les rayons ultraviolets descendent vers la surface, ils rencontrent des quantités de plus en plus grandes d'oxygène et donnent par conséquent naissance à des quantités de plus en plus grandes d'ozone. Cette concentration d'ozone accrue, cependant, finit par absorber la plus grande partie du rayonnement ultraviolet avant qu'il n'atteigne la basse atmosphère et la réaction s'estompe graduellement.

Les courants aériens, bien entendu, peuvent entraîner l'ozone vers la basse atmosphère, mais la plupart des molécules sont rapidement détruites lors de réactions chimiques avec d'autres gaz. Les concentrations naturelles d'ozone près de la surface sont donc plutôt basses. Comme l'ozone est nuisible tant pour les plantes que pour les animaux, sa rareté relative au niveau du sol est aussi importante à la survie sur Terre que l'est sa plus grande abondance en haute atmosphère.

La quantité totale d'ozone dans l'atmosphère représente un équilibre entre la vitesse à laquelle il est produit par le rayonnement solaire et celle à laquelle il est détruit lors de réactions chimiques avec d'autres gaz. Ces processus sont complexes, mettant en jeu plus de 300 réactions chimiques différentes et plus de 100 types de molécules différents.

Comme les processus subissent des fluctuations avec la saison et avec la latitude, les concentrations d'ozone varient au cours de l'année et d'une région du globe à l'autre (fig. 31). C'est ainsi que la couche d'ozone est plus mince au-dessus de l'équateur qu'aux pôles. Qui plus est, les concentrations en un endroit donné peuvent varier d'une journée à l'autre avec les changements des courants aériens dominants autour du globe.

## Les altérations dans la couche d'ozone

On a commencé à s'inquiéter pour la couche d'ozone vers la fin des années 1960 : la construction de vastes flottes

**Figure 30**
**Distribution verticale de l'ozone dans l'atmosphère**

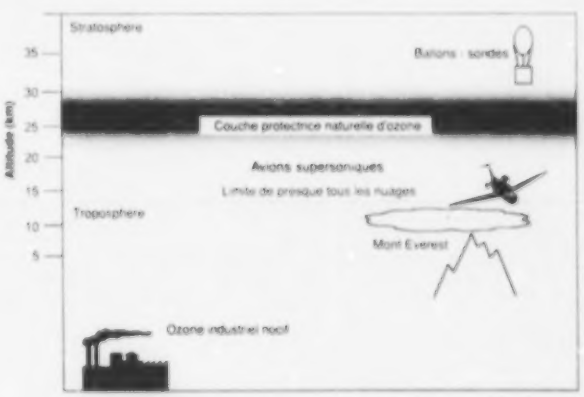
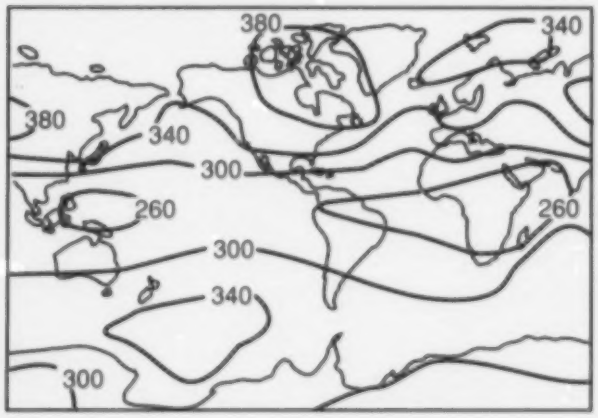


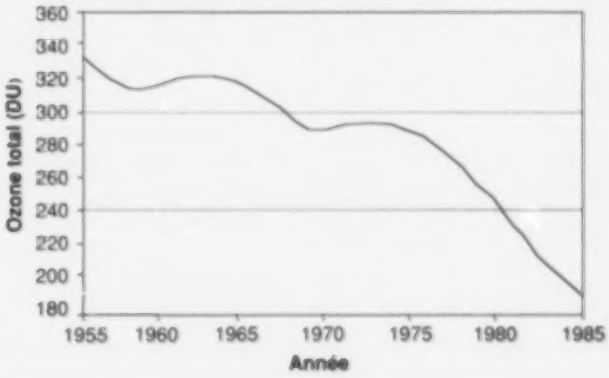
**Figure 31**
**Distribution globale moyenne d'ozone naturel**




SOURCE : London et Angell, 1982.

Les concentrations d'ozone sont mesurées en unités Dobson (DU). Cent DU sont égales à 1 mm d'ozone à la pression et à la température normales de la surface.

**Figure 32**
**Quantités d'ozone total au-dessus de Halley Bay, Antarctique, 1956 à 1985**




SOURCE : UNEP, 1987.

Les mesures des quantités d'ozone total au-dessus de Halley Bay au cours du printemps de l'hémisphère Sud montrent une diminution de 40 % entre 1956 et 1985. La courbe indique la moyenne lissée des mesures annuelles.

de transporteurs supersoniques volant à très haute altitude a fait craindre les éventuels effets destructeurs de la vapeur d'eau et des oxydes d'azote libérés par l'échappement de ces aéronefs.

En 1972, des scientifiques de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) ont soulevé une autre préoccupation — les effets des composés chlorés qu'émettrait la navette spatiale qui devait devenir opérationnelle dans les années 1980. Il s'est avéré que ces composés n'étaient pas rejetés en quantités suffisantes pour être nocifs, mais ces études ont été à l'origine de la découverte suivante : de grandes quantités de chlore avaient déjà été libérées dans l'atmosphère par l'utilisation de CFC.

Les CFC ont été mis au point dans les années 1930 pour remplacer l'ammoniac en réfrigération, mais leurs propriétés caractéristiques en ont fait d'excellents candidats pour bien d'autres applications. Comme ils sont chimiquement inertes, non toxiques et faciles à liquéfier, les CFC sont utilisés non seulement dans les réfrigérateurs et dans les climatiseurs, mais aussi comme agents de gonflement dans la production de mousses d'emballage et d'isolation, comme solvants de nettoyage des plaquettes de circuits électroniques et comme propulseurs d'aérosols.

En mai 1985, des chercheurs de la British Antarctic Survey ont publié des données qui ont fait l'effet d'une bombe dans la communauté scientifique. Leurs observations montraient que, de septembre à la mi-novembre, les concentrations d'ozone au-dessus de Halley Bay, en Antarctique, avaient baissé de 40 % par rapport aux niveaux des années 1960 (fig. 32). Ces découvertes étaient totalement imprévues. Aucune perte du genre n'avait jamais été relevée auparavant, ni par les instruments au sol en utilisation depuis 1957, ni dans les nombreuses mesures faites par satellite depuis les années 1970. Néanmoins, les scientifiques des États-Unis et du Japon ont rapidement entrepris des recherches dans leurs propres données et confirmé la réalité du phénomène.

Ce trou dans la couche d'ozone étant indéniable, les chercheurs ont fait face à toute une gamme de questions connexes. Le phénomène faisait-il partie d'un cycle naturel lié à l'activité solaire? Était-il causé par des conditions météorologiques propres à la région? Comment se faisait-il que les modèles atmosphériques courants n'aient pas pu simuler ces pertes? Pouvait-on tenir les réactions chimiques avec le chlore et les CFC pour seules responsables ou bien ces gaz agissaient-ils en conjonction avec d'autres substances chimiques ou d'autres conditions?

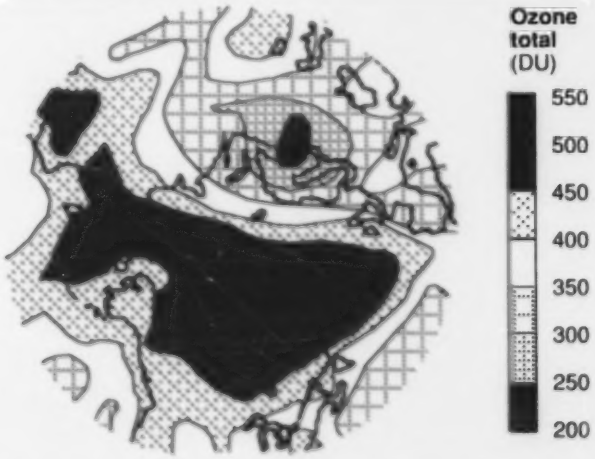
Dans cette quête d'indices scientifiques, on a rapidement mis sur pied un effort de recherche concerté. En 1986, les Américains envoyèrent en Antarctique quatre équipes différentes qui y firent des mesures poussées de l'ozone et d'autres substances chimiques quand le trou se manifesta de nouveau en septembre. Ces scientifiques arrivèrent à la con-

clusion que les données recueillies jusque-là ne s'inscrivaient pas dans les théories liant le trou de la couche d'ozone uniquement aux facteurs météorologiques ou à l'activité solaire. Pourtant, tout en déclarant qu'il avait probablement une cause chimique, ils ne purent pas l'attribuer aux CFC.

Les scientifiques canadiens sont à la recherche d'indices d'un phénomène du même ordre qui se produirait dans l'Arctique vers la fin de l'hiver. L'imagerie satellitaire de la mi-mars 1986 (fig. 33) semble montrer dans la configuration de l'ozone une structure en cratère assez similaire au trou de l'Antarctique. Ces images montrent deux fois plus d'ozone sur les bords que dans le creux. En reprenant les données satellitaires antérieures, on ne put pas trouver de structures aussi claires que celle-ci, mais des phénomènes assez semblables sont visibles pour certains hivers, dont celui de 1984. Les mesures du profil vertical de l'ozone à proximité du fond du cratère ont révélé des indentations ou des couches appauvries du même type que celles qu'avaient vues dans les profils antarctiques les scientifiques américains. Il est donc probable que l'Arctique connaisse une destruction de l'ozone similaire à celle constatée dans l'Antarctique. Dans la stratosphère arctique, les configurations de vent sont moins persistantes et les températures souvent plus élevées que dans l'Antarctique, ce qui explique probablement que l'appauvrissement y ait été moins spectaculaire et peut-être plus diffus que dans l'Antarctique. On pense que la destruction de l'ozone dans l'Arctique pourrait être la conséquence de l'appauvrissement général qu'on a observé au printemps sous les latitudes nordiques dans la dernière décennie.

La vitesse à laquelle la couche d'ozone s'appauvrit semble découler de l'extraordinaire efficacité du chlore à en détruire les molécules. Les atomes libres de chlore trouvent les molécules d'ozone et les détruisent en une ou deux secondes, libérant en sous-produit du monoxyde de chlore. Ce dernier, à son tour, libère son atome d'oxygène pour former de l'oxygène moléculaire, et l'atome de chlore peut reprendre le processus. Dans ce cycle continu de réactions, chaque atome de chlore joue un rôle de catalyseur, et peut entraîner la destruction de peut-être 100 000 molécules d'ozone ou plus avant que la réaction en chaîne ne finisse par s'éteindre (fig. 34).

**Figure 33**
**Ozone total au-dessus de la région du Pôle Nord en mars 1986**




Source : SEA, Environnement Canada.

Carte des mesures faites à partir d'instruments à bord d'un satellite. Une zone d'appauvrissement de l'ozone est visible dans le quadrant supérieur droit, au-dessus de l'URSS.

**Figure 34**
**Destruction de l'ozone par des catalyseurs**

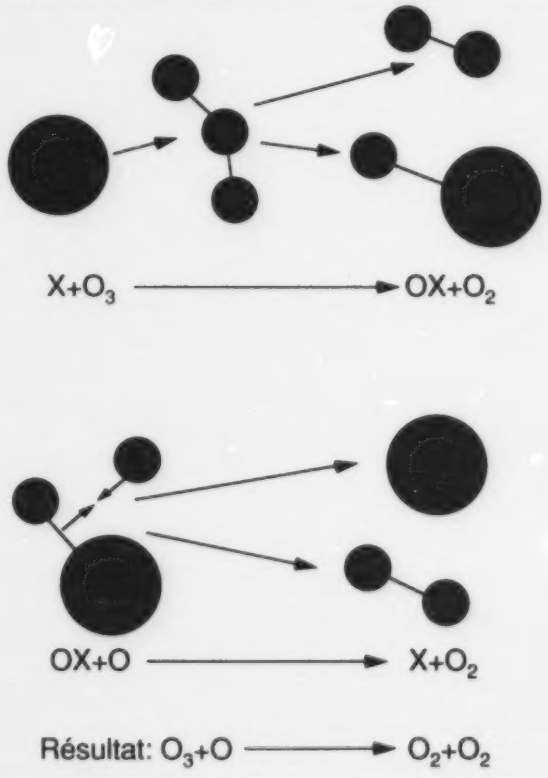



Illustration du processus de destruction de l'ozone atmosphérique par des catalyseurs (X) tels que le chlore, le brome, l'azote et l'hydrogène.

## La mesure des concentrations d'ozone

La variation naturelle des concentrations d'ozone peut atteindre 6 % sur une année. C'est pourquoi il est difficile de mesurer les tendances à long terme et encore plus de trouver des preuves concluantes de l'appauvrissement de la couche d'ozone. Comme il est important de la surveiller attentivement, la communauté scientifique internationale a mis sur pied un réseau mondial de stations de mesure. Les observations de ces stations sont centralisées au Centre mondial des données sur l'ozone, géré par Environnement Canada à Toronto.

La mesure des concentrations d'ozone dans la haute atmosphère fait appel à différentes techniques. D'énormes ballons à l'hélium, emportant leurs instruments jusqu'à des altitudes de 40 km, et des fusées de haute altitude permettent de mesurer la distribution verticale de ce gaz. Certains instruments sont assez sensibles pour mesurer du sol les concentrations en haute atmosphère; d'autres sont embarqués à bord de satellites pour donner un aperçu global de la profondeur totale de la couche d'ozone. Même la navette spatiale a été mise à contribution. En 1984, l'astronaute Marc Garneau a mesuré les concentrations d'ozone et de brume sèche dans la haute atmosphère, à l'aide d'un héliophotomètre mis au point par des scientifiques canadiens.

Au Canada, cinq stations effectuent des mesures au sol : celles de Toronto, Edmonton, Churchill, Goose Bay et Resolute. L'un des instruments qui ont été d'abord mis au point pour une utilisation canadienne, le spectrophotomètre d'ozone Brewer, s'est révélé l'outil le plus précis du monde pour la mesure d'ozone et sert maintenant à l'amélioration du réseau mondial de stations de mesure.

Les concentrations d'ozone dans l'atmosphère sont généralement données en unités Dobson. Cent Dobson représentent une couche de 1 mm d'ozone à la température et à la pression normales de la surface. Les études montrent que les concentrations peuvent varier de plus de 400 Dobson au printemps dans les régions polaires à moins de 250 Dobson toute l'année à l'équateur. Dans l'Antarctique, la différence entre le printemps et l'automne peut atteindre 50 %. Dans le trou d'ozone de l'Antarctique, qui se produit au printemps austral quand les taux d'ozone devraient être à leur maximum, on a obtenu des relevés de moins de 130 Dobson.

Bien qu'on ne puisse pas encore affirmer avec certitude qu'il y ait une baisse des concentrations moyennes globales d'ozone, les données des stations situées aux plus hautes latitudes de l'hémisphère Nord montrent une tendance dans ce sens (voir tableau ci-dessous). Ce déclin est généralement plus prononcé aux latitudes de l'Arctique et encore plus pendant l'hiver que pendant l'été. Les plus récentes tendances semblent même indiquer que le rythme de diminution s'accélère. Par exemple, les concentrations à Toronto ont baissé d'environ 3 % dans les 10 dernières années. Ces tendances pourraient certes être imputables aux variations naturelles causées par des phénomènes comme le cycle de onze ans des taches solaires; néanmoins, leur ampleur justifie qu'on s'en inquiète.

### Changements des concentrations moyennes d'ozone total, 1965-1986

| | | Pourcentage de changement entre 1965-1975 et 1976-1986 | | |
|---|---|---|---|---|
| Station | Latitude | Été | Hiver | Année |
| Resolute | 74,7 °N | -0,8 | -1,4 | -1,6 |
| Churchill | 58,8 | -1,4 | -4,2 | -2,5 |
| Edmonton | 53,6 | +0,8 | -4,7 | -1,8 |
| Goose Bay | 53,3 | -0,1 | -2,4 | -0,8 |
| Toronto | 43,8 | -1,3 | -1,3 | -1,2 |

Comme ils sont stables, les CFC sont un véhicule particulièrement efficace pour le transport du chlore dans la haute atmosphère. On estime que les composés de CFC les plus souvent utilisés (CFC-11, CFC-12 et CFC-113) ont un temps de séjour dans l'atmosphère de 75 à 110 ans. Ils ne se décomposent qu'après avoir été exposés au fort rayonnement de la haute atmosphère, ce qui fait que le phénomène ne se produit que là où il fait le plus de tort — dans la couche d'ozone.

Pour les trois principaux CFC, les concentrations atmosphériques observées ont monté brutalement dans les années 1970, quand leur utilisation par l'industrie et les consommateurs est devenue très généralisée. En 1974, la production annuelle en approchait un million de tonnes pour la planète. C'est au même moment que les concentrations de chlore dans l'atmosphère ont aussi monté de façon caractérisée. On estime que l'abondance «naturelle» de chlore libre dans l'atmosphère avant 1900 était d'environ 0,6 ppbv, et provenait en quasi-totalité du chlorométhane. Elle est à l'heure actuelle d'environ 3,5 ppbv et augmente de plus de 1,0 ppbv tous les dix ans. La corrélation impeccable entre l'augmentation du chlore atmosphérique et les pertes d'ozone subies pendant le printemps de l'Antarctique est

une forte preuve par présomption du rôle des CFC dans le processus.

Même si les CFC semblent poser le plus grand risque pour la couche d'ozone, ce ne sont pas les seules substances chimiques qui participent à sa destruction. D'autres, comme le chlorométhane et le tétrachlorure de carbone, transportent aussi le chlore vers la haute atmosphère. L'hydrogène, l'azote, le fluor et le brome peuvent aussi accélérer la décomposition de l'ozone et être emportés vers la haute atmosphère par des molécules stables et relativement insolubles, comme l'oxyde nitreux, le méthane et les gaz halons.

Exception faite des halons contenant du brome utilisés comme agents extincteurs, la plupart de ces gaz ont une origine naturelle aussi bien qu'anthropique. Tous montrent une augmentation de leur concentration atmosphérique, très rapide pour certains. La quantité de Halon 101 dans l'atmosphère augmente par exemple au rythme de 11 % par année. Cependant, les concentrations actuelles de tous ces gaz sont encore basses; on évalue présentement leur effet potentiel de destruction de l'ozone à environ 25 % de ceux du CFC 11 et du CFC 12.

Il y a plus de dix ans que l'on étudie l'appauvrissement de la couche d'ozone dû aux CFC et à d'autres composés, et les évaluations actuelles de l'étendue de cette destruction ne sont guère plus basses que les premières, faites dans les années 1970. On s'est néanmoins aperçu que le problème est beaucoup plus complexe qu'on ne le croyait au départ et que plusieurs autres sources de pollution ont une incidence sur la quantité totale d'ozone présente dans l'atmosphère. Par exemple, la production accrue de smog chimique imputable au transport routier dans les régions industrialisées a conduit à une augmentation de la quantité d'ozone dans la basse atmosphère. En outre, les changements de température en haute altitude découlant du renforcement de l'effet de serre pourraient entraîner des abondances plus grandes de l'ozone dans la haute atmosphère. Ces processus, et d'autres, pourraient partiellement compenser l'appauvrissement de la couche d'ozone par les CFC.

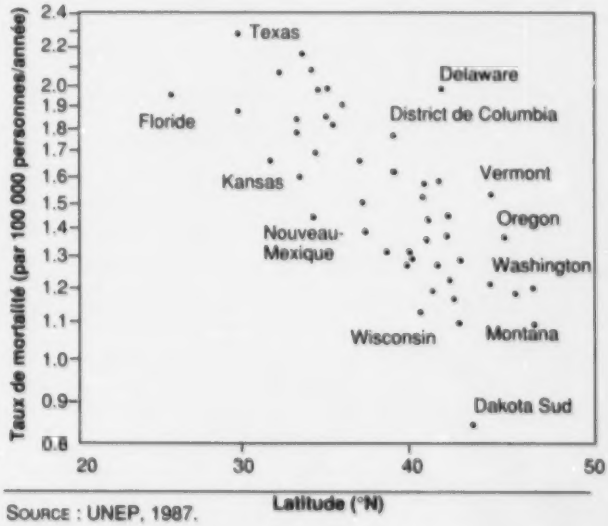
## Les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone

L'épaisseur de la couche d'ozone varie naturellement avec la latitude. Elle est plus grande aux pôles, où le rayonnement solaire est le plus faible, et moindre à l'équateur, où il est le plus fort. Les régions tropicales reçoivent donc nettement plus de rayonnement UV-B que les latitudes plus élevées. En fait, à l'équateur, près de 30 % des rayons UV-B qui pénètrent dans l'atmosphère atteignent la surface de la Terre, alors qu'aux latitudes plus élevées, cette proportion peut varier de près de 30 % par une claire journée d'été à seulement 10 % par un jour d'hiver nuageux. Les scientifiques estiment que, sur l'Amérique du Nord continentale, l'exposition moyenne de la surface aux UV-B augmente de 1 % pour un déplacement de 2 ou 3 degrés vers le sud.

Ces variations naturelles de l'intensité des UV-B peuvent donner des indices sur les conséquences possibles de l'appauvrissement de la couche d'ozone. Parmi les plus inquiétantes, figure l'augmentation des cas de cancer de la peau, surtout chez les populations à peau blanche. Les études montrent que l'incidence de cancer a une étroite corrélation avec la latitude, donc avec l'intensité de l'exposition aux UV-B. Dans une région du Texas, par exemple, le taux d'incidence de tous les types de cancer de la peau (379 cas pour 100 000 personnes par année) est trois fois supérieur à ce qu'il est plus au nord, en Iowa. Dans les États-Unis pris dans leur ensemble, le taux de mortalité dû aux cancers de la peau de type mélanome pour les états du sud est le double de celui des états du nord (fig. 35). En Union soviétique, les cancers de la peau représentent 15 à 26 % de tous les cas de cancer dans les régions du sud et 9 à 14 % dans le nord. Chez les populations à peau blanche, les taux de cancer les plus élevés se retrouvent dans le nord de l'Australie, région où l'exposition aux UV-B est très forte.

L'augmentation de l'exposition aux UV-B peut avoir d'autres répercussions sur la santé. Les recherches ont mon-

**Figure 35**
**Taux de mortalité due aux cancers de type mélanome associés à la latitude**




SOURCE : UNEP, 1987.

tré que le système immunitaire de l'organisme devient moins efficace à mesure qu'augmente cette exposition et que des maladies des yeux, comme les cataractes, risquent davantage de se produire.

D'autres animaux et organismes vivants font face également à des risques accrus. Comme les UV-B peuvent pénétrer dans l'eau claire, même certaines formes de vie marine (comme les algues, le plancton et les larves de poissons) sont vulnérables. Les études de laboratoire concernant les effets des UV-B sur les plantes montrent que généralement la photosynthèse décroît en raison des dommages subis par la chlorophylle et les hormones des plantes. Les expériences portant sur des plantes comme le coton, les pois, les haricots, les melons et le chou montrent une nette baisse de rendement quand l'exposition aux UV-B est plus élevée, alors que certaines autres plantes semblent plus résistantes aux dommages car leurs cellules contiennent des substances protectrices naturelles. Tout ceci porte à croire que l'appauvrissement de la couche d'ozone pourrait affecter profondément tant la production mondiale de nourriture que les écosystèmes naturels.

Cet accroissement de l'intensité du rayonnement ultraviolet à la surface de la Terre se traduira aussi par une accélération des processus causant le smog photochimique, mettant la santé humaine encore plus en péril et infligeant d'autres dommages aux plantes. Même les matériaux souffrent d'une exposition plus élevée aux UV-B. Les peintures fanent plus vite, les plastiques se dégradent plus rapidement, et bien des produits utilisés chaque jour durent moins longtemps.

Enfin, les changements de la colonne d'ozone (la distribution verticale de l'ozone dans l'atmosphère) auront une incidence sur le climat global. À mesure qu'il passera plus de rayonnement ultraviolet à travers une couche d'ozone appauvrie, la quantité d'ozone produite à bas niveau augmentera. Comme il absorbe tant l'énergie lumineuse du soleil que l'énergie thermique infrarouge, tout changement de sa distribution modifiera les températures de l'atmosphère, lesquelles régissent les configurations de la circulation globale et les précipitations.

*Chapitre 7*

# Comment faisons-nous face?

L'appauvrissement de la couche d'ozone et le changement climatique ne sont pas des préoccupations environnementales distinctes, mais bien deux aspects très liés de la même grande question fondamentale : l'effet des activités humaines sur la composition chimique de l'atmosphère elle-même. Non seulement l'appauvrissement de la couche d'ozone et le changement climatique ont certaines causes en commun, mais aussi leur interaction est complexe. Par exemple, les CFC ont le double résultat de menacer la couche d'ozone et de renforcer l'effet de serre. De même, la combustion du charbon produit à la fois du dioxyde de carbone et de l'oxyde nitreux (deux gaz à effet de serre, dont le dernier détruit aussi la couche d'ozone).

Qui plus est, les changements climatiques peuvent avoir une incidence directe sur la distribution de l'ozone. Par exemple, un effet de serre plus prononcé augmenterait la température dans la basse atmosphère mais, la diminuerait à haute altitude. Le taux net de production d'ozone global augmentant avec une diminution de la température de l'air, une telle diminution contribuerait à compenser l'appauvrissement chimique de la couche d'ozone.

Mais, l'inverse est aussi vrai. Des changements dans la distribution de l'ozone peuvent aussi influencés le climat. L'ozone, absorbant le rayonnement solaire incident et réchauffant l'air environnant, ce qui en change sa quantité dans une couche particulière de l'atmosphère, influera sur la température du milieu. Ces changements de température, à leur tour, pourraient entraîner un déplacement de la circulation atmosphérique et, de là, un changement dans les configurations climatiques globales.

Les activités humaines, cause des actuels changements atmosphériques, se divisent en trois grandes catégories connexes : les changements dans l'utilisation des terres, les activités industrielles et l'utilisation de combustibles fossiles. Ces mêmes activités sont aussi à l'origine d'autres grands problèmes de contamination de l'atmosphère, comme la pollution de l'air locale, les pluies acides et la brume arctique; ces derniers, eux aussi, ont des relations complexes avec le réchauffement global et l'appauvrissement de l'ozone. Par exemple, l'ozone de la basse atmosphère, un des principaux composants du smog, contribue à l'effet de serre en ce qu'il enlève les groupes hydroxyle qui débarrassent l'atmosphère du méthane. De même, la brume arctique est une question préoccupante, non seulement à cause de ses effets sur l'écologie de l'Arctique mais aussi parce qu'elle renforce le réchauffement hivernal dans le Grand Nord, ce qui à son tour influe sur le système climatique global.

Les dégâts infligés à l'environnement sont parfois la résultante de plusieurs de ces stress. Les forêts agressées par l'acidité accrue des sols, par exemple, peuvent être beaucoup plus vulnérables aux changements ou aux extrêmes climatiques. Les données scientifiques recueillies laissent penser que le dépérissement à grande échelle des forêts européennes n'est pas dû à une cause unique mais à un ensemble de facteurs : dommages imputables à l'ozone de la basse atmosphère, précipitations acides et sécheresse.

Il est donc indispensable de comprendre ces interrelations pour formuler une politique efficace de réaction à ces questions. En s'attaquant à l'un de ces problèmes, on touche à plusieurs autres, voire à tous; il n'est donc pas question d'élaborer des stratégies au coup par coup. Seule une approche holistique pourra donner des résultats probants.

## Comment faire face aux incertitudes scientifiques?

En juin 1988, la Conférence mondiale sur l'Atmosphère en évolution réunissait à Toronto des décideurs, des scientifiques, des économistes et d'autres

Groupe de travail composé de scientifiques et de décideurs discutant du réchauffement global lors de la Conférence de Toronto, en 1988.

experts venus du monde entier. Tous s'inquiétaient beaucoup de ce que l'incidence des activités anthropiques sur l'atmosphère était devenue telle qu'elle correspondait à une «expérience inconsciente qui touche l'ensemble du globe et dont les conséquences définitives ne le céderaient en rien sinon à une guerre nucléaire mondiale». Sept mois plus tard, l'Assemblée générale des Nations Unies reprenait ces préoccupations et incitait les gouvernement du monde entier à considérer le changement climatique comme une question prioritaire. Par la suite, des conférences de ministres, aux Pays-Bas en novembre 1989, en Norvège en mai 1990 et en Suisse en novembre 1990, soulignaient la nécessité d'entreprendre la négociation d'ententes internationales visant à stabiliser les émissions de gaz à effet de serre le plus tôt possible.

Dans le monde entier, d'éminents hommes d'état et scientifiques continuent de faire état des mêmes profondes préoccupations. Comme il s'écoulera probablement des décennies avant que l'atmosphère ne réagisse aux mesures que nous prendrons, la plupart des experts s'entendent pour qu'on en décide immédiatement. Cette conclusion s'impose d'autant plus qu'un grand nombre des conséquences du changement atmosphérique risquent d'être irréversibles et que la société est souvent lente à changer. Les décisions que nous prenons — ou ne prenons pas — aujourd'hui façonneront l'évolution de la société et de l'environnement pour les décennies, voire les siècles, à venir.

Pourtant, et en particulier à propos du réchauffement climatique, il se manifeste une forte opposition de la part de ceux qui prétendent qu'il est inutile de prendre des mesures responsables dès maintenant, puisque nos connaissances sont encore insuffisantes sur les phénomènes qui se déroulent dans l'atmosphère et sur la façon dont elle y réagira. Les discussions scientifiques sont de nature spéculative et certaines de nos conclusions pourraient être totalement fausses. Il est, de même, des scientifiques et des décideurs pour avancer l'idée que, étant donné le coût de mesures de réduction des émissions polluantes, nous ne devrions rien faire tant que nous ne sommes pas parfaitement certains que c'est nécessaire et que nous n'avons pas une meilleure compréhension des choix possibles.

Nous devons donc faire un choix entre, d'une part, des coûts économiques et sociaux, qui peuvent être considérables, dans le présent et, d'autre part, le risque d'un éventuel changement de l'environnement, changement qui pourrait être catastrophique mais pourrait aussi bien ne jamais se manifester. Que faire devant un tel dilemme? Comment comparer l'incertitude scientifique d'un côté à des coûts qui pourraient entraîner des bouleversements et de l'autre aux risques, qui pourraient être énormes, de mesures erronées? La découverte d'une stratégie appropriée passe peut- être par l'évaluation et l'analyse des risques, technique couramment utilisée dans des domaines où règne l'incertitude, comme l'économie et l'actuariat, et à laquelle nous faisons nous-mêmes souvent appel inconsciemment en prenant nos décisions personnelles.

Quand on prend ce genre de décisions, il y a deux types d'erreur que l'on risque de commettre. La première (erreur de type A) est de prendre des mesures en prévision de quelque chose qui ne se matérialise pas. La seconde (erreur de type B) est de ne pas prendre de mesures pour prévenir ou prévoir quelque chose qui se manifeste finalement. La prise de décision repose habituellement sur la probabilité d'occurrence de l'événement, le coût des mesures prises et les conséquences possibles qu'aurait l'événement s'il se produisait. Si le coût des mesures est trop élevé, étant donné le degré d'incertitude, et que le coût de l'inaction reste acceptable, alors on peut prendre le risque d'une erreur de type B et ne rien faire. Dans d'autres cas, si les mesures sont relativement peu onéreuses ou que les conséquences de l'inaction risquent d'être graves, il est préférable de choisir l'action. C'est ainsi que nous assurons nos maisons contre l'incendie, même si le risque en est relativement bas, parce que les primes d'assurance sont minimes en comparaison des coûts du sinistre. En appliquant ces stratégies de réflexion, nous pouvons déterminer les domaines où il convient de prendre des mesures immédiates et ceux qui demandent une meilleure compréhension et une évaluation plus précise.

## Vers un accord international

En intégrant l'évaluation des risques à leurs méthodes de planification, les nations peuvent, individuellement, prendre de nombreuses mesures utiles. Mais, malgré la valeur de mesures prises unilatéralement, il est essentiel que tous les pays du monde collaborent pour que leur réaction au changement climatique soit efficace à l'échelle de la planète. Une étape fort critique de cette réaction est donc l'établissement d'un consensus. Dans les dernières années, au cours de plusieurs grandes réunions internationales, on a tenté d'en arriver à une compréhension commune des questions et d'explorer la faisabilité d'une action globale collective. Ces réunions produisent maintenant un début de consensus international centré sur les principes d'action suivants.

1. *Le principe du développement durable est essentiel à toute stratégie d'action.* Tant dans les nations industrialisées que dans les nations en développement, le développement économique passe nécessairement par la gestion et la protection des ressources de l'environnement. Loin d'être contradictoires, les intérêts de l'économie et ceux de l'environnement dépendent l'un de l'autre de bien des façons. On doit envisager de nouvelles approches pour intégrer les préoccupations environnementales et sociales à la prise de décisions économiques d'une manière plus systématique, plus ciblée et mieux coordonnée.

2. *La recherche et la surveillance doivent être renforcées.* L'Organisation météorologique mondiale, en collaboration avec le Programme des Nations Unies pour l'environnement et le Conseil international des unions scientifiques, a activement contribué à évaluer la question du changement climatique et à organiser des recherches supplémentaires dans le monde entier. Par contre, le succès de ces programmes internationaux repose sur la vigueur de programmes nationaux. Même si bien des pays ont créé de tels programmes, ils ont un net besoin de ressources accrues et d'une plus grande coordination. Il faudra aussi consacrer davantage de travail à l'élaboration des stratégies et des technologies nécessaires pour faire face au changement climatique.

3. *Des mesures doivent être prises pour limiter le changement atmosphérique.* La simple précaution veut que, s'il existe un risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique totale ne doit pas justifier qu'on tarde à prendre des mesures visant à prévenir la dégradation de l'environnement. Toute mesure visant à limiter le changement atmosphérique, et donc le changement climatique, est ainsi essentielle et nullement prématurée. En fait, il est peut-être même déjà plus que trop tard. Le Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone est un bon exemple de ce qu'on peut faire. C'est grâce à cette entente que les CFC devraient être éliminés d'ici la fin du siècle. On pourrait aussi parvenir à réduire considérablement les émissions de dioxyde de carbone, et cette réduction doit découler de deux mesures simultanées : l'amélioration de l'efficacité énergétique et la mise au point de remplacements des combustibles fossiles.

4. *L'action doit être équitable.* Les nations industrialisées ont été, et sont encore, la principale source des polluants à l'origine des changements atmosphériques, mais les nations en développement peuvent bien être plus vulnérables que les premières aux conséquences de ces changements et moins en mesure d'y faire face. Les pays industrialisés doivent donc supporter la responsabilité première de la réduction des émissions de polluants atmosphériques. Ce sont par contre les nations en développement qui, maintenant, contribuent à la quasi-totalité des émissions de carbone dues au déboisement des forêts tropicales; en outre, leur présent apport de 20 % aux émissions globales de carbone dues à l'utilisation de combustibles fossiles passera probablement à 50 % d'ici 2050. Il est donc essentiel qu'elles aussi prennent des mesures actives visant à limiter les émissions polluantes futures.

   Si elles veulent y parvenir tout en étendant leurs perspectives de développement et en se préparant aux incidences du changement climatique, il leur faudra innover dans le domaine des partenariats et des mécanismes de financement. Parmi les mesures proposées jusqu'ici, figurent l'effacement de la dette du Tiers monde, la mise en œuvre de grands programmes de reboisement et la création d'un fonds mondial pour le transfert de ressources financières. Un tel fonds sera financé par des taxes sur les combustibles fossiles ou par des contributions des nations industrialisées.

5. *L'action doit être coordonnée et coopérative.* Notre atmosphère, élément critique de l'environnement, est accessible à tous, mais n'appartient à personne. Non seulement donc est-il essentiel d'assurer sa protection pour le bien-être commun, mais encore est-ce la responsabilité de tous. Les mesures globales doivent s'inscrire dans le cadre de grandes conventions par lesquelles les nations s'engageront à la protéger. Il est en outre important que les efforts nationaux soient coordonnés par l'entremise d'organismes internationaux, en particulier ceux de la famille des Nations Unies. De même, la coopération bilatérale et régionale doit être encouragée.

6. *Le public doit être sensibilisé davantage.* À bien des points de vue, c'est là le principe le plus important, puisque l'efficacité des actions dépend du climat de l'opinion, qui doit éviter l'apathie, tout comme l'hystérie, face aux questions en jeu. Il faudra, par le biais de conférences, de réunions et de publications, sur les plans international, national et local, faire progresser la compréhension et l'éducation des scientifiques, des décideurs et du grand public.

## La réaction à l'échelle planétaire

Le changement atmosphérique n'est devenu une grande question d'actualité qu'au début des années 70, et c'est seulement vers la fin de la décennie qu'ont été entrepris de grands programmes internationaux de recherche sur le sujet.

En 1979, un grand élan a été donné à la collaboration mondiale dans l'étude du réchauffement global et du changement climatique, quand l'Organisation météorologique mondiale et deux autres organismes scientifiques internationaux ont lancé le Programme climatologique mondial (PCM). Le PCM avait reçu le mandat de promouvoir et de coordonner la recherche internationale portant sur les processus climatiques planétaires et sur les incidences de la variabilité et du changement du climat. En 1986, le Conseil international des unions scientifiques a mis sur pied son ambitieux Programme international géosphère-biosphère (PIGB) destiné à améliorer notre compréhension de la manière dont la Terre entretient un écosystème vivant et à examiner l'évolution passée et présente de cet écosystème.

Un programme complémentaire sur la Réaction de la société aux changements dans le monde a aussi été créé conjointement par un autre groupe d'organismes scientifiques internationaux.

Ces programmes ont déjà substantiellement accru notre compréhension du système climatique global et la sensibilisation de la société aux changements qui s'y effectuent. Les recherches qui se poursuivent étoffent notre connaissance de la façon dont certains éléments, comme les nuages, la glace de mer et le cycle hydrologique, influent sur les processus climatiques. Elles contribuent aussi à éclaircir certaines grandes incertitudes telles que le rôle complexe des océans, en tant que réservoir de gaz à effet de serre et en tant que puits, source et véhicule de chaleur. Comme l'incidence des variations climatiques sur les écosystèmes variera d'une région à l'autre, on consacre de grands efforts à élaborer des modèles plausibles de changements climatiques régionaux. À mesure que la recherche avancera, les études d'incidence devront déterminer quels systèmes naturels et humains sont les plus vulnérables au changement climatique et les étudier plus en profondeur que les études actuelles ne peuvent le faire. Elles devront porter une attention particulière à l'incidence totale de toutes les agressions contre les écosystèmes naturels, dont les précipitations acides, l'augmentation du rayonnement ultraviolet, la pollution atmosphérique locale et le changement climatique proprement dit.

La mise en œuvre de tels programmes internationaux de recherche repose sur des programmes nationaux étoffés et disposant d'un financement suffisant. Comme plusieurs autres pays, le Canada a des programmes nationaux de recherche climatique engagés dans ces activités multinationales. Il n'y a cependant pas assez de programmes nationaux, surtout dans les régions en développement, et ceux qui existent n'ont pour la plupart pas assez de ressources pour entreprendre toute la recherche nécessaire. Il est donc crucial de renforcer ces programmes et d'en élargir la portée.

À l'heure actuelle, les gouvernements du monde entier tentent de s'entendre sur l'élaboration de politiques visant à faire face au changement climatique. La Conférence mondiale sur l'Atmosphère en évolution de 1988, tenue à Toronto sous les auspices du gouvernement canadien, a été l'un des points tournants dans la réalisation de ce processus. La conférence, réunissant près de 300 politiciens, décisionnaires, experts légaux, environnementalistes et scientifiques a permis l'échange d'idées sur les inquiétudes des scientifiques sur le changement atmosphérique et proposé des recommandations sur la stratégie d'action à la communauté mondiale. La prise de consciense des politiciens quant à ces inquiétudes fut l'une des importantes réalisations de la conférence. Une autre fut la recommandation de réduire les émissions globales de dioxyde de carbone de 20 % des niveaux de 1988 d'ici 2005. Aujourd'hui, cet objectif est encore le point principal de discussions internationales.

Après le point tournant qu'a été la Conférence de Toronto, des experts en matière de droit et de politiques venus du monde entier se sont réunis à Ottawa au début de 1989 pour discuter de la faisabilité d'une entente ou d'une convention internationale globale visant la protection de l'atmosphère de la planète. Cette idée a été poussée plus avant lors de la réunion d'un groupe de ministres de l'environnement aux Pays-Bas à la fin de 1989. Parallèlement, l'Organisation météorologique mondiale, le Programme des Nations Unies pour l'environnement et le Conseil international des unions scientifiques ont en collaboration mis sur pied le Groupe d'experts intergouvernemental pour l'étude du changement climatique (IPCC) regroupant des conseillers en matière de politiques et des scientifiques de 38 nations. L'IPCC avait la responsabilité de rédiger un rapport faisant le point sur l'état des connaissances scientifiques touchant le changement climatique et sur ses incidences et proposant aux gouvernements diverses stratégies d'adaptation. Ce rapport a été présenté en octobre 1990 lors de la deuxième Conférence mondiale sur le climat et soumis aux Nations Unies.

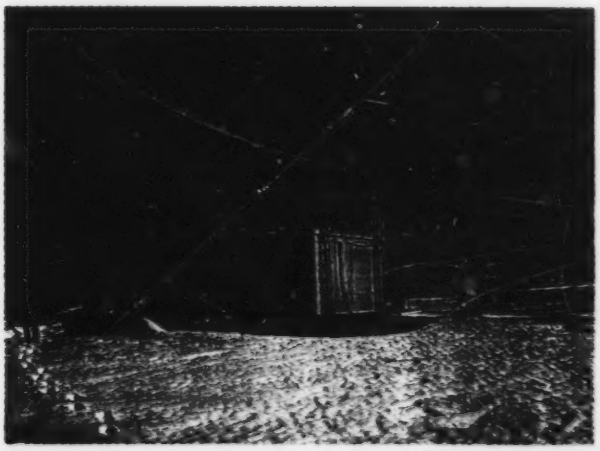
En outre, le changement climatique est de plus en plus considéré comme une question prioritaire par d'autres tribunes multilatérales, comme l'Assemblée générale des Nations Unies, l'Agence internationale de l'énergie, l'Organisation de coopération et de développement économiques et le Sommet économique annuel du Groupe des Sept. Il a aussi été un sujet de premier plan lors de discussions bilatérales entre divers chefs d'État. Des négociations internationales en vue d'élaborer une convention internationale sur le réchauffement global, qui pourrait être signée lors la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement qui se tiendra au Brésil en 1992, sont aussi en cours.

Alors que la réaction de la communauté internationale au changement climatique n'a pas dépassé le stade de la recherche et de la discussion, les mesures visant à limiter l'appauvrissement de la couche d'ozone ont été prises plus rapidement et plus énergiquement. La coopération internationale concernant l'ozone a commencé à être formalisée en 1977 lorsque le PNUE a créé le Comité de coordination de la couche d'ozone qui a donné les premières évaluations de nos connaissances scientifiques du problème et de ses incidences sur les politiques publiques. En 1981, le PNUE commençait d'envisager la possibilité que soit élaborée une convention globale destinée à protéger la couche d'ozone. Celle-ci a finalement été signée par 22 pays en 1985. En septembre 1987, une étape encore plus importante a été franchie, lorsque 24 nations ont signé le Protocole de Montréal, par lequel elles s'engageaient à réduire d'ici 1999 les émissions de substances qui appauvrissent la couche d'ozone (essentiellement des CFC) à 50 % des niveaux de 1986. Le Protocole est entré en vigueur le 1er janvier 1989.

Bien des scientifiques trouvaient cependant que l'objectif de 50 % était insuffisant et que le Protocole devrait être renforcé dans le sens d'une élimination des émissions des CFC les plus nocifs et d'une réduction plus importante des émissions d'autres gaz destructeurs. Cette opinion a reçu l'appui de plusieurs pays, dont le Canada, lors de discussions internationales ultérieures et a conduit à un accord, signé à Londres en juin 1990, visant l'élimination graduelle des CFC les plus destructeurs et des halons d'ici l'an 2000. Le Canada et un certain nombre d'autres pays ont annoncé leur intention d'atteindre cet objectif d'ici 1997.

## La réaction du Canada

Au Canada, bien des universités et autres instituts de recherche effectuent directement ou indirectement des études concernant le changement climatique, et les efforts formels de recherche en ce domaine sont coordonnés par l'entremise du Programme climatologique canadien (PCC), géré par Environnement Canada. Dans la dernière décennie, le PCC, en étroite collaboration avec le PCM, a suscité des recherches poussées sur les processus climatiques et sur les implications du changement climatique pour les Canadiens. En tant que participant au réseau de stations de surveillance de la pollution atmosphérique de fond de l'OMM, le Canada mesure les concentrations de dioxyde de carbone et de plusieurs autres gaz atmosphériques à trois stations (Île de Sable, N.-É.; Alert, T. N.-O.; Cape Saint James, C.-B.). On effectue également des études sur les incidences climatiques d'un effet de serre renforcé, à l'aide du complexe modèle de circulation générale d'Environnement Canada.



Station canadienne de surveillance des gaz à effet de serre à Alert, T. N. - O. L'Île de Sable (N.-É.) et Cape Saint James (C.-B.) sont d'autres emplacements de surveillance.

Simultanément, une vingtaine d'études ont été faites pour le PCC sur les effets qu'auraient, à l'échelle du Canada, des climats types à doublement du $CO_2$ sur les écosystèmes et sur les activités économiques et sociales. D'autres études ont porté sur les climats préhistoriques, sur les tendances actuelles du climat et sur le cycle que décrit le carbone entre la biosphère, les océans et l'atmosphère. Des ententes bilatérales d'échange et de coopérations scientifiques sur les questions de changement climatique ont été conclues avec plusieurs pays, dont la Chine, l'Allemagne, les Pays-Bas et l'URSS.

Sur le plan international, le Canada donne le ton en ce qui concerne l'élaboration de politiques de réaction au changement climatique. En 1988, la Conférence mondiale sur l'Atmosphère en évolution a réussi à transmettre aux décideurs internationaux les préoccupations des scientifiques face au changement atmosphérique et à lancer la discussion sur les stratégies d'adaptation. Le Canada a aussi été l'hôte des discussions de suivi tenues par des juristes internationaux sur l'élaboration d'une convention-cadre internationale visant à protéger l'atmosphère et participe activement à des négociations visant à établir une telle convention sur le réchauffement global. Les experts canadiens jouent maintenant, par le biais de l'IPCC, un rôle de premier plan dans l'élaboration des modèles de politiques.

En tant que pays, le Canada n'est pas un de ceux qui contribuent le plus aux émissions mondiales de substances chimiques qui modifient l'atmosphère; cependant, en moyenne, pour ses citoyens, c'est différent. Dans son ensemble, le pays n'est responsable que d'environ 2 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone provenant de combustibles fossiles, mais cela revient à 20 tonnes par Canadien par année. C'est là deux fois plus que les émissions moyennes par habitant des pays développés de l'Europe de l'Ouest, et environ quatre fois plus que la moyenne mondiale.

Son climat nordique, ses vastes étendues et son économie basée sur l'usage intensif des ressources naturelles contribuent tous à une utilisation relativement élevée d'énergie par personne. Malgré cela, ces dernières années, le Canada a été moins efficace que la plupart des autres pays développés à améliorer son rendement énergétique. Il nous est possible de réduire considérablement l'ampleur de nos émissions de dioxyde de carbone, et il nous faudra le faire pour maintenir internationalement notre crédibilité face aux questions environnementales. Qui plus

## Le Plan vert et le réchauffement global

Le Plan vert, présenté en décembre 1990, énonce la grande stratégie environnementale du gouvernement fédéral. Il formule des mesures que le gouvernement poursuivra pour stabiliser les concentrations mondiales de gaz à effet de serre et fait partie de sa réponse au réchauffement global.

En premier lieu, il a pour but de renforcer les engagements du gouvernement quant à la stabilisation, d'ici l'an 2000, des émissions canadiennes de dioxyde de carbone et des autres gaz à effet de serre aux niveaux de 1990. Le Plan engage aussi le pays à examiner les possibilités techniques et économiques de plus grandes réductions de ces émissions, l'objectif de 20 % proposé à la Conférence de Toronto en 1988 en faisant partie. La prévision des effets possibles du réchauffement global et comment s'y préparer, ainsi que l'amélioration de nos connaissances scientifiques des problèmes qui nous font face sont d'autres composantes du Plan. D'une façon plus précise, le Plan propose :

- Une loi sur le rendement énergétique et les énergies nouvelles visant à réglementer les normes minimales de rendement énergétique des équipements consommateurs d'énergie; à étiqueter les produits selon leur rendement énergétique; et à améliorer les normes d'utilisation de l'énergie pour les bâtiments, les automobiles et autres moyens de transport.
- Une accélération de la mise au point de carburants de remplacement et leur pénétration des marchés.
- Des programmes d'information destinés à mettre les Canadiens au défi de saisir toutes les occasions de réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- Un programme de reboisement communautaire visant à ajouter 325 millions d'arbres à nos forêts urbaines et rurales.
- Des mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre attribuables au secteur agricole.
- La préparation d'un rapport sur les moyens économiques visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- Des études intégrées pour améliorer l'évaluation des impacts économiques et sociaux causés par un réchauffement climatique sur diverses régions géographiques du Canada et l'adoption de lignes de conduite pertinentes pour s'assurer que l'on tient compte de ces impacts lors de la prise de décisions importantes.
- Un appui accru à la recherche scientifique et à l'analyse du changement climatique.
- L'élaboration d'accords bilatéraux avec les provinces et les territoires afin d'uniformiser la stratégie d'action nationale.

est, la plupart des mesures que nous devrons prendre pour réduire ces émissions nous seront profitables économiquement et nous rendront plus concurrentiels face aux industries d'autres pays.

Puisque nous devons réduire nos émissions de dioxyde de carbone, comment y parvenir le plus efficacement? Pendant l'été 1988, les ministres de l'énergie du Canada ont chargé un groupe de travail sur l'environnement de trouver des réponses à cette question. Le Groupe de travail a présenté son rapport aux ministres en août 1989; ce rapport indiquait que le pays pourrait faire un grand pas pour réduire, d'ici 2005, ses émissions de dioxyde de carbone de 20 % par rapport aux niveaux de 1988 : il s'agirait essentiellement de lancer des programmes attrayants d'économie d'énergie et d'efficacité énergétique. Néanmoins, pour atteindre pleinement cette réduction de 20 %, il faudrait effectuer une réduction nette de 40 % des niveaux projetés pour 2005, ce qui serait difficile à faire.

On peut aussi réduire les émissions de dioxyde de carbone par une utilisation accrue de l'énergie renouvelable de la biomasse et un développement plus poussé de technologies et d'installations utilisant des sources d'énergie sans carbone, comme les énergies solaire, éolienne et hydroélectrique. Certains experts avancent aussi qu'il est moins dangereux et plus acceptable de faire davantage appel à l'énergie nucléaire, bien qu'elle soit en elle-même une cause de préoccupation environnementale, que de continuer à utiliser des combustibles fossiles.

En mars 1990, les ministres de l'environnement se sont entendus pour établir une stratégie nationale sur le réchauffement global. Cette stratégie, dont les Canadiens ont pris connaissance en novembre 1990, vise trois principaux objectifs :

1. limiter l'émission des gaz à effet de serre provenant de toutes les sources émettrices;

2. aider les Canadiens à anticiper les effets possibles de tout réchauffement futur et à s'y préparer;

3. améliorer nos aptitudes scientifiques afin de comprendre et de prévoir le changement climatique.

L'apport du gouvernement fédéral à cette stratégie d'action nationale constitue une partie importante de sa grande stratégie environnementale (voir l'encadré page précédente). Un des éléments importants de ce plan est de «stabiliser, d'ici l'an 2000, les émissions de $CO_2$ et des autres gaz à effet de serre aux niveaux de 1990». Plusieurs provinces ont déjà entrepris des programmes d'action, d'autres suivront sous peu. Les municipalités elles-mêmes jouent un rôle dynamique, et Toronto et Vancouver ont entrepris d'ambitieux plans qui visent à réduire le risque de réchauffement global.

Le Canada joue un rôle de premier plan dans les efforts destinés à limiter l'appauvrissement de la couche d'ozone dans les domaines de la coopération scientifique et de l'élaboration de politiques. L'utilisation par les scientifiques canadiens d'instrumentation de surface, ou portée par ballon, ainsi que de données satellitaires, pour mesurer régulièrement la colonne d'ozone atmosphérique forme l'élément principal de notre contribution à la surveillance globale de la couche d'ozone. Le Canada gère en outre le Centre mondial des données sur l'ozone qui collige les données recueillies par un réseau mondial de stations coordonnées par l'OMM et distribue l'information aux scientifiques du monde entier. Les chercheurs canadiens ont en outre mis au point des instruments très évolués de mesure de l'ozone, comme l'héliophotomètre, utilisé lors d'un vol de la navette spatiale américaine en 1984, et le spectrophotomètre d'ozone Brewer, qui devrait l'être dans de futurs vols spatiaux et est déjà l'instrument standard du réseau mondial de surveillance de l'ozone.

En ce qui concerne les politiques, le Canada a interdit en 1980 l'utilisation des CFC dans la plupart des aérosols, ce qui a fait baisser de 45 %, à l'échelle nationale, la consommation de ces substances. De plus, il s'est toujours fortement prononcé en faveur de contrôles internationaux plus vastes et, en 1987, a été l'hôte de la rencontre historique dont est issu le Protocole de Montréal. Depuis, le Canada a contribué à convaincre la communauté internationale de viser plus loin que les réductions de 50 % demandées par le Protocole et d'éliminer complètement d'ici l'an 2000 l'utilisation des CFC les plus nocifs. Le Canada a annoncé qu'il tentera d'éliminer totalement d'ici 1997 la production des CFC destructeurs d'ozone. Comme ce sont aussi des gaz à effet de serre très puissants, cette mesure contribuera à ralentir le renforcement de l'effet de serre, de même qu'à freiner la destruction future de l'ozone.

## Le rôle des citoyens

Comment chacun d'entre nous peut-il, comme citoyen, infléchir le résultat d'une question environnementale mondiale qui pose déjà un défi de premier ordre au jugement et aux ressources des organismes internationaux et des gouvernements du globe? La réponse est toute simple : les citoyens engendrent le climat d'opinion qui incite les gouvernements à agir. C'est eux qui doivent manifester leur soutien aux politiques et faire les changements qu'exige la réaction efficace à la crise actuelle.

Les citoyens peuvent influencer les politiciens, les fabricants, et s'influencer les uns les autres, par le biais de leur pouvoir électoral, de leurs habitudes de consommation et de leurs gestes quotidiens. Les 20 milliards de tonnes qui sont libérés chaque année dans l'atmosphère ne sont pas le fait des gouvernements, mais bien de plus de 5 milliards de personnes qui vivent sur la planète. Proportionnellement, les Canadiens y contribuent plus que d'autres. Chaque fois que nous remontons le thermostat, démarrons la voiture, ouvrons le robinet d'eau chaude ou la porte du réfrigérateur, nous ajoutons au problème. Si nous pouvons faire une différence, c'est en modifiant nos habitudes et notre mode de vie, en nous penchant davantage sur la question et en changeant notre attitude face à l'environnement.

Notre influence ne se limite pas aux questions de politiques; il y a bien des choses que nous pouvons faire dans notre vie de tous les jours pour alléger le fardeau de l'environnement. On trouvera à la fin du rapport une liste de ces gestes personnels.

Finalement, cependant, ce qui comptera, ce sera le changement dans notre façon de percevoir nos ressources naturelles. L'environnement n'est pas une source inépuisable, ni une poubelle sans fond pour les déchets et détritus de notre société industrielle. C'est bien plutôt un organisme vivant, capable de se régénérer presque indéfiniment, tant que ses complexes équilibres et interdépendances sont respectés. Il nous faut vivre en harmonie avec les processus environnementaux. Au lieu d'exploiter la Terre, il nous faut la garder et la protéger.

# Protéger l'atmosphère : un devoir personnel

### À la maison :

- Veillez à ce que la maison soit bien isolée.
- Ne montez pas trop le thermostat en hiver.
- En été, limitez les besoins en climatisation : installez des stores ou faites de l'ombre avec des arbres ou des auvents.
- Isolez le réservoir du chauffe-eau; bien isolé, il peut consommer jusqu'à 10 % d'énergie en moins.
- Si vous avez un chauffage au mazout, envisagez la conversion au gaz naturel. Par unité d'énergie, ce dernier émet 40 % de carbone en moins (sous forme de $CO_2$) que le mazout.
- À l'achat de nouveaux appareils, comparez les taux de consommation énergétique et essayez de choisir le plus efficace. Ainsi, un réfrigérateur-congélateur canadien de 500 L, modèle deux portes, consomme en moyenne 1 275 kWh d'électricité par année; il existe cependant des modèles qui n'en consomment que 650, et on a mis au point des prototypes qui n'exigent que 500 kWh par année.
- Envisagez de rendre votre éclairage plus efficace. On trouve maintenant des ampoules fluorescentes compactes utilisables dans les douilles standard pour ampoules à incandescence, qui sont quatre fois plus efficaces que l'ampoule à incandescence correspondante et qui durent 8 à 15 fois plus longtemps. Il a été calculé que, lors de sa durée utile, chaque ampoule fluorescente peut diminuer de plus de 350 kg la production de $CO_2$ d'une centrale à charbon.
- Éteignez la lumière chaque fois que vous le pouvez. Pour alimenter une ampoule à incandescence de 100 watts, allumée 24 heures par jour pendant un an, une centrale à charbon devra émettre environ 800 kg de $CO_2$, soit environ 4 % des émissions par habitant de dioxyde de carbone provenant de l'utilisation de combustibles fossiles.

Au Canada, l'industrie du transport est responsable d'environ 30 % des émissions de dioxyde de carbone.

### En voiture:

- Entretenez votre voiture : moteur réglé et pneus gonflés correctement. Un véhicule en bon état peut consommer jusqu'à 10 % de carburant en moins.
- Roulez dans l'esprit de l'économie d'énergie. Ne dépassez par la vitesse limite imposée, évitez les arrêts et démarrages brusques, planifiez vos déplacements pour suivre les itinéraires les plus efficaces. En outre, ne laissez pas trop tourner le moteur au ralenti : un véhicule à l'arrêt mais moteur en marche a une consommation de 0 km au litre!
- Choisissez bien votre véhicule et faites de la consommation un facteur important de votre choix. Si possible, envisagez un système à carburant de remplacement, surtout au gaz naturel. Lorsqu'il est disponible, choisissez le carburol.
- Pour aller au travail, vous pouvez peut-être prendre les transports en commun ou faire appel au covoiturage. Actuellement, la voiture canadienne moyenne consomme environ 12 L de carburant aux 100 km. Si votre trajet aller et retour est de 20 km par jour, le déplacement est donc de 5 000 km par année. Sur la base de la consommation moyenne, il vous faudra 600 L de carburant. On émet ainsi plus de 1 400 kg de $CO_2$, soit 7 % des émissions par habitant de $CO_2$ imputables à l'utilisation de combustibles fossiles. Le même trajet fait en autobus donne des émissions de moins de 200 kg par passager par année. Un détail au passage : aux États-Unis, où les voitures neuves sont les pires du monde sur le plan de l'efficacité énergétique, une amélioration de la consommation moyenne d'un litre au km seulement réduirait les émissions de $CO_2$ d'environ 3,3 millions de tonnes par année, ce qui correspond grosso modo à la fermeture d'une centrale au charbon moderne de 450 MW.

**Dans vos habitudes :**

- Sachez choisir. Achetez des produits qui ne consomment pas trop d'énergie, recyclabes et réutilisables. Les bouteilles consignées, par exemple, consomment moins d'énergie que les bouteilles jetables.

- Évitez les produits utilisant des CFC. Non seulement les CFC endommagent-ils la couche d'ozone, mais ce sont aussi des gaz à effet de serre très puissants.

- Participez aux programmes locaux de recyclage. La fabrication de produits faits de matériaux recyclés demande beaucoup moins d'énergie. Le moulage sous pression d'une pièce d'aluminium faite de métal recyclé demande 95 % d'énergie de moins que celle que l'on fabrique à partir de métal primaire.

- Faites connaître vos préoccupations environnementales aux politiciens qui vous représentent; encouragez-les à adopter les législations qui s'imposent.

- Enfin, demandez aux services publics locaux, au ministre de l'énergie de la province ou à Énergie, Mines et Ressources Canada de vous donner d'autres renseignements et conseils sur l'économie d'énergie.

De toute évidence, les individus peuvent considérablement réduire leur contribution aux émissions de gaz à effet de serre (en particulier de $CO_2$ et de CFC). Il faut aussi se souvenir que toute amélioration de l'efficacité énergétique aide à réduire l'émission de substances qui contribuent à d'autres problèmes environnementaux, comme les précipitations acides, la pollution de l'air des villes et l'appauvrissement de la couche d'ozone.

## Sources des figures et des tableaux


Boden, T.A., P. Kanciruk et M.P. Farrell. 1990. *Trends '90: A Compendium of Data on Global Change*. ORNL/CDIAC–36. Washington: Department of Energy.

Critchfield, H.J. 1983. *General Climatology*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.

Folland, C.K., T.R. Karl et K. Ya Vinnikov. 1990. *Variations et changement observés*. Aspects scientifiques du changement climatique : Rapport du Groupe de travail I de l'IPCC. OMM, Genève, p. 197-246.

Gates, W.I. 1985. *Modeling As a Means of Studying the Climate System*. In Projecting the Effects of Increasing Carbon Dioxide (MacCracken, M.C. et F.M. Luther, éd.) Washington: Department of Energy, p. 63.

Griffith, J.F. et D. M. Driscoll. 1982. *Survey of Climatology*. Columbus, Ohio: Merrill.

Houghton, J.T., G.J. Jenkins et J.J. Ephraums, éd. 1990. *Aspects scientifiques du changement climatique*. OMM, Genève.

Lane, P. and Associates Limited. 1986. *Étude préliminaire des effets éventuels d'une hausse d'un mètre du niveau de la mer à Charlottetown, Île-du-Prince-Édouard*. Toronto : SEA, Environnement Canada.

Liou, K.N. 1980. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. New York: Academic Press.

Lockwood, J.G. 1974. *World Climatology: An Environmental Approach*. London: Edward Arnold.

London, J. et K. Angell. 1982. *The Observed Distribution of Ozone and Its Variations*. In Stratospheric Ozone and Man, vol. 1 (Bower, F.A. et R.B. Ward, éd.). Boca Raton, Florida: CRC Press, pp. 7–42.

MacCracken, M.S. et F. M. Luther, éd. 1985. *Projecting the Effects of Atmospheric Carbon Dioxide*. Washington: Department of Energy.

McKay, G.A. et H.G. Hengeveld. 1990. *The Changing Atmosphere*. In Planet In Peril (Mungall, C. et D.J. McLaren, éd.). Toronto: Oxford University Press, p. 46–79.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 1989. *Geophysical Monitoring for Climatic Change*. No. 17: Summary Report 1988. Washington: Department of Commerce.

Rizzo, B. 1990. *Communication personnelle*.

Sanderson, M. 1987. *Répercussions d'un changement de climat sur la navigation et la production d'électricité dans les Grands Lacs*. SCC 87–03. Toronto : SEA, Environnement Canada.

Stocks, B. 1991. *The Extent and Impact of Forest Fires in Northern Circumpolar Countries*. In Proceedings of the Chapman Conference on Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications, Williamsburg, Virginia, March 1990. Sous presse.

United Nations Environmental Programme (UNEP). 1987. *The Ozone Layer*. UNEP/GEMS Environmental Library No. 2. Nairobi: UNEP.

Warrick, R. et J. Oerlemans. 1990. *Élévation du niveau de la mer*. Aspects scientifiques du changement climatique : Rapport du Groupe de travail I de l'IPCC. OMM, Genève, p. 264-288.

Watson, R.T., H. Rodhe, H. Oeschger et U. Siegenthaler. 1990. *Gaz à effet de serre et aérosols*. Aspects scientifiques du changement climatique : Rapport du Groupe de travail I de l'IPCC. OMM, Genève, p. 1-46.

Wigley, T.M.L. et T.P. Barnett. 1990. *Détection de l'effet de serre dans les observations*. Aspects scientifiques du changement climatique : Rapport du Groupe de travail I de l'IPCC. OMM, Genève, p. 247-263.

Williams, G.D.V., R.A. Fautley, K.H. Jones, R.B. Stewart et E.E. Wheaton. 1987. *Estimating the Effects of Climatic Change on Agriculture in Saskatchewan, Canada*. In The Impacts of Climate Variations on Agriculture, vol. 1 (Parry, M.L., T.R. Carter et N.T. Konijn, éd.). Dordrecht: Reidel.

World Meteorological Organization. 1989. *Scientific Assessment of Stratospheric Ozone*, 1989. WMO Global Research and Monitoring Project—Report No. 20. Geneva: WMO.

World Resources Institute. 1990. World Resources, 1990-91: *A Guide to the Global Environment*. New York: Oxford University Press.

## Quelques ouvrages utiles


Berner, R.A. et A.C. Lasagna. 1989. *Modelling the Geochemical Carbon Cycle*. Scientific American 260 (3): 74–81.

Boyle, S. et J. Ardill. 1989. *The Greenhouse Effect: A Practical Guide to the World's Changing Climate*. London: New English Library.

Broecker, W.S. et G.H. Denton. 1990. *Les cycles glaciaires*. Pour la science 149, p. 62.

Bruce, J.P. 1990. *L'atmosphère de la Terre, planète vivante*. Genève: Organisation météorologique mondiale, n° 735.

Foukal, P.V. 1990. *Le Soleil : une étoile variable*. Pour la science 150, p. 32.

Graedel, T.E. et P.J. Crutzen. 1989. *L'évolution de l'atmosphère*. Pour la science 145, p. 36.

Gray, C.L. et J.A. Alison. 1989. *The Case for Methanol*. Scientific American 261 (5): 108–14.

Houghton, J.T., G.J. Jenkins et J.J. Ephraums, éd. 1990. *Climate Change: The IPCC Assessment*. New York: Cambridge University Press.

Houghton, R.A. et G.M. Woodwell. 1989. *Le réchauffement de la Terre*. Pour la science 140, p. 22.

Jean, M. 1990. *Conséquences d'un changement climatique sur le système du Saint-Laurent : Éléments d'une problématique*. Le Climat 8 (1), p. 49–74.

Jones, P.D. et T.M.L. Wigley. 1990. *La Terre se réchauffe*. Pour la science 156, p. 38.

Kirkham, I.R. 1988. *The Changing Atmosphere: Implications for Ontario Seasons*. Seasons 28 (4), p. 24–35.

Leggett, J. 1990. *Global Warming: The Greenpeace Report*. New York: Oxford University Press.

Organisation météorologique mondiale. 1989. *Actes de la Conférence : L'Atmosphère en évolution*, Toronto juin 1988. Genève : Organisation météorologique mondiale.

Roan, S. 1989. *Ozone Crisis*. New York: Wiley.

Schneider, S.H. 1987. *La modélisation du climat*. Pour la science 117, p. 90.

Schneider, S.H. 1989. *Le changement des climats*. Pour la science 145, p. 36.

Schneider, S.H. 1989. *Global Warming: Are We Entering the Greenhouse Century?* San Francisco: Sierra Club Books.

World Resources Institute. 1990. World Resources, 1990-91: *A Guide to the Global Environment*. New York: Oxford University Press.

## Liste des rapports sur l'état de l'environnement

Nº. 89-1: *Les polluants dans le milieu marin de la Colombie-Britannique – Rapport sur l'état des connaissances*. B.H. Kay. Protection de l'environnement, Région du Pacifique et du Yukon, Environnement Canada. 1989.

Nº. 89-2: *La nature aux abois – Les espèces menacées de disparition au Canada*. J.A. Burnett, C.T. Dauphiné Jr., S.H. McCrindle et T. Mosquin. Service canadien de la faune, Environnement Canada. 1989.

Nº. 90-1: *Perspective canadienne sur la pollution atmosphérique*. J. Hilborn et M. Still. État de l'environnement et Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada. 1990.

Nº. 90-2: *Les contaminants chez les oiseaux de mer du Canada*. David Noble. État de l'environnement et Service canadien de la faune, Environnement Canada. 1990.

Nº. 91-1: *Le point sur l'établissement d'un ensemble national d'indicateurs environnementaux au Canada*. Groupe de travail sur les indicateurs, État de l'environnement, Environnement Canada. 1991.

Nº. 91-2: *Comprendre l'atmosphère en évolution : Revue de la science de base et des implications d'un changement du climat et d'un appauvrissement de la couche d'ozone*. H. Hengeveld. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada. 1991.